



APORTES A LA MOVILIDAD ELÉCTRICA PROYECTO VECTORES

**GASTÓN TURTURRO
(compilador)**



PIUBAES
PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE LA
UBA SOBRE ENERGÍAS SUSTENTABLES



.UBAINVESTIGACIÓN
Secretaría de Ciencia y Técnica

.UBAfiuba 
FACULTAD DE INGENIERÍA

APORTES A LA MOVILIDAD ELÉCTRICA PROYECTO VECTORES

**GASTÓN TURTURRO
(compilador)**



PIUBAES
PROGRAMA INTERDISCIPLINARIO DE LA
UBA SOBRE ENERGÍAS SUSTENTABLES



JBA INVESTIGACIÓN
Secretaría de Ciencia y Técnica

.UBAfiuba 
FACULTAD DE INGENIERÍA

Aportes a la movilidad eléctrica : proyecto vectores / Joaquín Chazarreta... [et al.] ;
compilación de Gastón Turturro ; Prólogo de Aníbal Cofone ; Luciano Cianci. -
1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Eudeba, 2022.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-950-23-3264-2

1. Electricidad. 2. Ingeniería Eléctrica. 3. Máquinas Eléctricas. I. Chazarreta, Joaquín.
II. Turturro, Gastón, comp. III. Cofone, Aníbal, prolog. IV. Cianci, Luciano, prolog.
CDD 621.3104



Eudeba
Universidad de Buenos Aires

Primera edición: junio de 2022

Fuentes de las imágenes: Pixabay y iStockphoto
Imagen de tapa: Felix Müller desde Pixabay

© 2022

Editorial Universitaria de Buenos Aires
Sociedad de Economía Mixta
Av. Rivadavia 1571/73 (1033) Ciudad de Buenos Aires
Tel.: 4383-8025 / Fax: 4383-2202
www.eudeba.com.ar

Corrección y composición general: Eudeba

Impreso en Argentina.
Hecho el depósito que establece la ley 11.723



No se permite la reproducción total o parcial de este libro, ni su almacenamiento en un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, fotocopia u otros métodos, sin el permiso previo del editor.

ÍNDICE

PRÓLOGO. <i>Aníbal Cofone</i>	9
PRÓLOGO. <i>Luciano Cianci</i>	11
INTRODUCCIÓN. <i>Gastón Turturro</i>	13

PRIMERA PARTE: PRODUCCIÓN

FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE BUSES ELÉCTRICOS PARA EL MERCADO ARGENTINO.....	17
---	----

Joaquín Chazarreta, Mariela Chhab y Patricio Priano

FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA CREACIÓN DE UNA FLOTA MIXTA DE BUSES PARA GRANDES URBES. BUSES A: EE: ENERGÍA ELÉCTRICA, GNC, BIODIESEL, BUSES RECONVERTIDOS DE DIÉSEL A EE/GNC/BIODIESEL Y BUSES HÍBRIDOS.....	29
---	----

Guadalupe Acosta Olano

FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN DE COMPONENTES LOCALES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA CADENA DE VALOR DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN TRANSPORTE PÚBLICO.....	37
--	----

Ramiro Sicardi y María Eugenia Wasylk

DESARROLLO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ARGENTINA	49
--	----

Facundo Jurado y Irina Winokur

SEGUNDA PARTE: ENERGÍA INFRAESTRUCTURA

ESTUDIO DE CONSUMO DE ENERGÍA DE BUSES ELÉCTRICOS PARA TRANSPORTE PÚBLICO CON RECORRIDO DEFINIDO, CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE AUTONOMÍA Y SISTEMAS DE CARGA	67
--	----

Gonzalo Ezequiel Fichera

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ARGENTINA. SU USO COMO ALMACENAMIENTO
E IMPACTO EN LOS ESCENARIOS ENERGÉTICOS Y COSTOS DE LARGO PLAZO75
Darío Slaienstein

ESTRATEGIA Y HOJA DE RUTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE CARGA
PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN TRANSPORTE PÚBLICO.....95
Lucas Ferrari

TERCERA PARTE: MICROMOVILIDAD

PLAN INTEGRAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALQUILER
DE BICICLETAS COMPARTIDAS FLOTANTES.....121
Marcos Lalanne y Fernando Paulucci

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el aporte, dedicación y orientación a cada una de las siguientes personas que desde sus respectivos lugares han contribuido a la elaboración de estos artículos y esta publicación:

Ing. Sebastian Guim (FIUBA)
Ing. Marcos Gadze (FIUBA)
Ing. Martín Cornes (FIUBA)
Ing William Menegotto (Agrale)
Ing. Guillermo Garaventa (UNLP)
Ing. Marcelo Van Zandweghe (VZH)
Lic. Darío Caggegi (DAFA)
Ing. Alejandro Gottig (Consultor experto)
Inga. Carolina Arze (FIUBA)
Inga. Romina Solana (FIUBA)
Lic. Maximiliano Velázquez (FADU)
Ing Edgardo Vinzon (FIUBA)
Ing. José Pablo Cebreiro (FIUBA)
Ing Diego Marino (INTI)
Ing. Claudio Damiano (Consultor experto)
Ing. Matias Ubogui (FIUBA)
Lic. Milagros Garros (GCBA)
Ing. Daniel Rigou (FIUBA)
Ing. Darío Slaifstein (FIUBA)
Dr. Fernando Nicchi (FIUBA)
Ing. Martín Calissano (FIUBA / SeCyT)
Ing. Juan Medina (FIUBA)
Ing. Patricio Priano (FIUBA)
Ing. Sebastián Canziani (FIUBA)
Ing. Agustín Conti (FIUBA)
Ing. Arturo Papazian (FIUBA)
Ing. Cristian Molerés (FIUBA)

Ing. Eduardo Gigante (Consultor experto)

Ing. Eriel Fernandez Galván (FIUBA)

Ing. Mariano Almanza (FIUBA)

Inga. María Eugenia López Conde (FIUBA)

Y a todos los docentes, graduados y referentes que se fueron sumando al vector luego de la publicación de estos trabajos.

PRÓLOGO

Me complace presentar y acompañar la publicación de este material que aborda un tema estratégico y disruptivo que es la movilidad eléctrica. Esta publicación se ha realizado por un grupo de trabajo compuesto por estudiantes, docentes y referentes con el aporte del sector productivo local que aborda los segmentos de buses para transporte público y vehículos tipo *city car*, el sector energético y la micromovilidad en el ámbito del desarrollo urbano.

Aunque con diferentes niveles de desarrollo en esta edición, el contenido coincide con la agenda actual en discusión sobre la posibilidad de tener prontamente una Ley de Movilidad Eléctrica, en la cual todos estos sectores son abordados. Por eso no caben dudas del excepcional aporte que la Universidad, y en este caso particular la Facultad de Ingeniería podría estar haciendo para tal fin.

Este trabajo es el resultado de un modo diferente de hacer investigación y desarrollo en el mundo universitario. Por un lado, en su construcción participó intensamente el sector productivo, áreas de gestión pública y profesionales del área, junto con los propios recursos de la Facultad de Ingeniería y toda la UBA. Por el otro, la construcción por objetivos, que busca resultados concretos y aporte a la sociedad, más que la construcción de conocimientos por contenidos que suelen implicar tiempos muy largos y dificultad para resolver problemas reales de la sociedad.

Esta construcción es un aporte a la solución de un escenario que aún no existe en forma masiva, aunque, desde todo punto de vista, imaginamos claramente una migración a la movilidad eléctrica en las grandes ciudades, donde personas y empresas podrán cargar energía con fuentes más limpias, más sostenibles, y que impactarán positivamente en la vida de este planeta, tratando de desplazar a un paradigma que hace 100 años era la mejor opción, pero ya no lo representa.

Para terminar, es para mí una enorme satisfacción poder colaborar en la presentación de esta publicación hecha con mucha dedicación de un equipo tan grande, en el cual reconozco la visión y el esfuerzo pionero del Ing. Gastón

Turturro y agradezco a nuestra editorial Eudeba, una de las más importantes editoriales universitarias de habla hispana.

Espero que esta edición sea un aporte concreto al desarrollo de sistemas que generen valor productivo local y en paralelo hagan más sostenible el planeta.

Dr. Ing. Aníbal Cofone
Secretario de Ciencia y Técnica
de la Universidad de Buenos Aires

PRÓLOGO

La publicación de este libro representa un nuevo punto de llegada inicial para el desarrollo de nuestro vector Movilidad Eléctrica, dado que permite condensar, por primera vez en formato libro, una serie de valiosos aportes (producciones anteriores de divulgación que consistieron en cuadernillos y en material audiovisual) para contribuir al avance de esta modalidad tecnológica en nuestro país asociada a una agenda de cuidado del ambiente, y resultando al mismo tiempo una excelente oportunidad para el desarrollo industrial y tecnológico nacional.

Además, por haber sido elaborado sobre la base de los resultados obtenidos en el marco de Trabajos Profesionales y Tesis, representa un aporte fundamental adicional: sus autores, ahora graduados/as o próximos a recibir su diploma, se insertan en el medio con una base formativa destacada para realizar aportes a los desafíos –y a la capitalización de las oportunidades– que implica la introducción de la movilidad eléctrica en nuestro país. Por otra parte, su elaboración implicó la formación de redes colaborativas que conectaron con fluidez y sinergia comunidades de diversas disciplinas de las que forman parte del variado acervo de la UBA. En este caso con énfasis en las ingenierías, así como de estudiantes con sus docentes y con graduados/as especialistas, lo cual representa un activo perdurable con valor en sí mismo.

Quiero expresar mi satisfacción y mi agradecimiento especial a todos/as quienes han hecho posible el crecimiento de una iniciativa que ya conecta a más de 200 personas en 12 temáticas estratégicas, en especial al Decano de nuestra Facultad de Ingeniería, Ing. Alejandro Martínez, y al Secretario de Ciencia y Técnica de nuestra Universidad de Buenos Aires, Dr. Ing. Aníbal Cofone, por el invaluable apoyo que le han brindado desde sus inicios. También quiero reconocer el aporte de cada uno/a de quienes con su trabajo comprometido y de excelencia –el Ing. Gastón Turturro se destaca entre ellos/as– hacen posible resultados como este, que forma parte de una etapa inicial y fundacional del Proyecto en la cual la prioridad está puesta en la generación de bases sólidas

para fortalecer el rol de nuestra Universidad como agente de relevancia para la transformación virtuosa de la Argentina.

Ing. Luciano Cianci
Subsecretario de Relación con Graduados – Facultad de Ingeniería UBA
Integrante del Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Desarrollo,
PIUBAD

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de estos artículos se ha producido en el marco del vector de *Movilidad Eléctrica* perteneciente a uno de los doce ejes estratégicos presentados por el *Proyecto Vectores* de la Universidad de Buenos Aires y en el marco del Programa Interdisciplinario de Energías Sustentables de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UBA. Creemos en la importancia de la formación de profesionales que comiencen a abordar el tema, desde sus inicios de la carrera profesional, con una mirada interdisciplinaria, ya que involucra la necesidad de especialización en varias ramas como tecnología, infraestructura, producción, economía, urbanismo, ambiente, regulación, etc.

La importancia de este vector radica en la oportunidad que presenta para una potencial participación del sector productivo nacional en un tema estratégico, que año tras año está cobrando mayor protagonismo a nivel mundial en materia de innovación tecnológica y matriz productiva, y se presenta como disruptivo en aspectos operativos de sectores como transporte y energía.

Durante los últimos seis años, la flota mundial de vehículos eléctricos (especialmente en los segmentos de livianos y transporte público) se incrementó significativamente a razón de los notables avances tecnológicos y el apoyo de políticas que fomentan el incremento de ventas y el despliegue de infraestructura de carga. En el año 2021, las ventas de automóviles eléctricos (100% a batería e híbridos *enchufables*) superaron unas seis millones y medio de unidades a nivel mundial, sobrepasando el récord del 2020, y permitiendo alcanzar el stock mundial de más de 16 millones de vehículos eléctricos.

Luego de la COP25, gran parte de los gobiernos han comenzado a fijar metas graduales y terminales de prohibición de ventas de vehículos a combustión interna en el mediano y largo plazo. A su vez, las principales automotrices han hecho anuncios de lanzamientos de nuevos modelos, objetivos de ventas y planes de inversión para adaptar o modernizar sus procesos productivos durante los próximos años respondiendo a estas exigencias de los reguladores. Se espera que luego de los compromisos asumidos en la COP26, estas tendencias se aceleren. La Argentina y la región también vienen dando sus primeros

pasos en el sector a fin de introducir gradualmente los primeros vehículos eléctricos.

Es uno de los desafíos del vector *Movilidad Eléctrica* el análisis de los diferentes segmentos en los que se puede aportar valor desde lo académico, en articulación con el sector público y privado. De las cinco líneas de trabajo abordadas por este vector (producción de vehículos eléctricos, infraestructura, movilidad y desarrollo urbano, litio y baterías; y ambiente), en esta publicación se encontrarán abordadas diversos objetivos de estudio de las tres primeras líneas: producción, infraestructura y desarrollo urbano (micro-movilidad). Nos encontramos trabajando además en el análisis de las otras dos líneas que complementan el vector, con especial atención en el potencial que representan las reservas comprobadas de litio en la Argentina, que forma parte del triángulo del litio y actualmente es el cuarto productor mundial del mineral en grado batería; y en la integración del sector con las energías renovables, fundamental para complementar en forma total la descarbonización del sector.

Estas investigaciones se han desarrollado durante el período 2019 a 2021 en el marco de Trabajos Profesionales y Tesis de las disciplinas Ingeniería Industrial y Eléctrica, en el que los estudiantes han interactuado con la red de trabajo generada en el marco del vector, de la cual son parte docentes, graduados y referentes de la materia en el ámbito público y privado. También se han plasmado los resultados de la articulación con otras facultades y disciplinas de la Universidad de Buenos Aires, empresas y organismos del sector público y privado. Los y las miembros/as del vector extendemos el mayor de los agradecimientos a personas y entidades por haber contribuido al desarrollo de estos trabajos.

Mg. Ing. Gastón A. Turturro
Coordinador del Vector Movilidad Eléctrica
Docente Facultad de Ingeniería UBA
Programa Interdisciplinario de Energías Sustentables

PRODUCCIÓN



FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE BUSES ELÉCTRICOS PARA EL MERCADO ARGENTINO

Joaquín Chazarreta, Mariela Chhab Mariela y Patricio Priano

Resumen

La siguiente investigación aborda un relevamiento de la situación actual del mercado global de buses eléctricos, remarcando tendencias, casos de éxito a nivel mundial y una determinación del potencial mercado de buses eléctricos de la Argentina, identificando las exigencias técnicas, económicas y el marco necesario para el éxito de esta tecnología como servicio de transporte masivo en nuestro país.

Una vez definidas las características del bus eléctrico nacional y su demanda proyectada, sobre el proceso de fabricación artesanal de una de las fábricas líderes del país en la producción de chasis para buses urbanos tradicionales, se realizaron las hipotéticas modificaciones sobre este para poder producir los buses eléctricos, cubriendo los principales requerimientos técnicos y relevando proveedores nacionales e internacionales.

1. Introducción

La siguiente investigación fue desarrollada como trabajo final de Ingeniería Industrial de los autores en el marco del Proyecto Vectores, temática movilidad eléctrica, dentro del Programa Interdisciplinario de la UBA (PIUBAS). Este está en articulación con los siguientes programas:

- *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Transporte (PIUBAT)*
- *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Cambio Climático (PIUBACC)*
- *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Energía Sustentable (PIUBAES)*
- *Programa Interdisciplinario de la UBA para el Desarrollo (PIUBAD)*

Este trabajo tuvo como propósito analizar la factibilidad técnica y viabilidad económica de la producción nacional de buses eléctricos, con la mayor

integración nacional de componentes posible y realizar una proyección de la demanda potencial del mercado.

Para la confección del presente trabajo se realizó un extenso trabajo de campo, generando las primeras vinculaciones en materia de movilidad eléctrica con instituciones académicas y gubernamentales como la UNLP, el gobierno de la Ciudad de Bs. As. y el INTI. También se establecieron colaboraciones con empresas privadas del sector automotriz, desde fabricantes de motores, baterías hasta plantas de ensamble de chasis y carrocerías. Se trabajó articuladamente con especialistas de distintas carreras dentro de la Facultad de Ingeniería y con colaboradores internacionales. Se asistió a foros y paneles con temática de movilidad eléctrica, se visitaron empresas e instituciones educativas y se mantuvieron entrevistas con diferentes referentes-expertos del tema.

Luego de tratar con los distintos especialistas del tópico, así con todas las empresas y organismos a los cuales acudimos en búsqueda de información y asesoramiento, pudimos concientizarnos acerca de la importancia del enfoque interdisciplinario del proyecto, y de lo enriquecedor que es tener miradas desde distintos ángulos y temáticas distintas entre sí, para así hacer que el producto final sea lo más completo y abarcador posible.

Conforme fue avanzando la investigación, se definió analizar una fábrica de colectivos en funcionamiento para poder estudiar cuáles serían las modificaciones y costos asociados para poder readaptar la línea y comenzar a fabricar también unidades eléctricas. La empresa seleccionada para este fin fue una firma reconocida del sector en cuestión que por motivos de discreción no será mencionada.

2. Metodología

El trabajo realizado, si bien implicó meses de investigación previa y análisis de información de distintas fuentes y organismos, presenta la estructura convencional de la cátedra de Trabajo Profesional de Ingeniería Industrial, que propone analizar la factibilidad de realización de un proyecto de negocio desde el punto de vista de mercado, técnico y económico-financiero con el propósito adicional de realizar un aporte a la sociedad, en este caso disminuir el impacto ambiental generado por el transporte público terrestre. Al ser uno de los tres primeros trabajos de este tipo dentro de la FIUBA, requirió un esfuerzo adicional para establecer vínculos con organismos, empresas, expertos, etc., dentro y fuera del ámbito académico.

Como primer paso se realizó una investigación de la situación actual del país en cuanto a la movilidad eléctrica y los vehículos eléctricos en general.

Por tratarse de un mercado todavía en sus inicios, sin desarrollo, y carente de un marco regulatorio que promueva la movilidad eléctrica, los buses eléctricos representaban un producto totalmente nuevo, de hecho nuestra investigación comenzó meses antes del inicio de las pruebas piloto con buses eléctricos importados que se realizaron entre 2019 y 2020 en Mendoza y CABA. Luego se procedió entonces al plano internacional, se analizó Sudamérica con el fin de buscar indicios de un potencial mercado. Se observó que algunos países de la región empezaban a mostrar indicios de una lenta y leve penetración de vehículos eléctricos en general (se analizaron estadísticas de patentamientos y parque automotor, lo que generó, en muchos casos, los gráficos propios), en su mayoría pequeños autos para uso particular pero todavía la presencia de buses eléctricos era muy escasa, salvo algunas pruebas piloto en distintos países, con la excepción de Chile y Colombia que contaban con algunas decenas de buses eléctricos en circulación (unidades de origen Chino). Por lo tanto, se decidió estudiar los casos de éxito a nivel internacional, focalizando en los primeros años en que se incorporaron los buses eléctricos buscando establecer similitudes con la región sudamericana y nuestro país.

Con el fin de poder establecer las características técnicas que deberían cumplir los buses eléctricos para poder circular por el territorio nacional, se realizó un estudio de mercado de los buses urbanos que circulan por el AMBA (área metropolitana de Bs. As.), ya que estos representan el 30% de la flota total nacional y deben cumplir las exigencias técnicas más altas de todo el país para poder circular. Se estimó la potencial demanda de los buses eléctricos mediante dos escenarios:

Por un lado, para proyectar la demanda mínima se afectó la producción nacional de buses urbanos tradicionales por el grado de penetración (patentamientos de buses eléctricos sobre el total de patentamientos de buses) que tuvieron los buses eléctricos los primeros años en España, conclusión que sale de un largo análisis de buscar variables macroeconómicas comparativas con la región sudamericana y cuyo segmento de vehículos eléctricos tiene una penetración anual similar al mercado sudamericano.

Y, por otro lado, se estableció la demanda máxima planteando que el gobierno de CABA respetara el compromiso que asumió al firmar el acuerdo del C40 en París y reemplazara toda la flota por unidades eléctricas. Para simular este recambio se siguió el ejemplo de cómo se dio el reemplazo de la flota total de Londres (ciudad de Europa con la mayor penetración de buses) en los primeros años, que tiene una flota de buses urbanos similar y constante como la de la Ciudad de Buenos Aires y un desplazamiento y aglomeración demográfica similar.

Luego de determinar la potencial demanda y las características técnicas principales (autonomía, velocidad, etc.) para poder asegurar la fabricación de

un producto atractivo para el cliente se realizó una encuesta a los dueños de las principales flotas de buses de AMBA y se estableció un precio máximo que ellos estarían dispuestos a pagar por un bus eléctrico. Y así, para poder definir la mejor estrategia a seguir para el desarrollo del proyecto se elaboró una matriz FODA y las matrices de evaluación de los factores internos y externos que se desprenden de esta.

En el estudio técnico se realizó un relevamiento de todas las tecnologías utilizadas a nivel mundial y se seleccionó y dimensionó un conjunto de componentes específicos para armar una configuración de un bus eléctrico que sea económicamente viable de fabricar a nivel nacional, minimizando la importación de componentes y beneficiando la integración local. Para ello, se realizó un largo trabajo de campo, contactándose con cada uno de los especialistas y fabricantes de los principales componentes del bus eléctrico.

Una vez diseñado el bus eléctrico se procedió a realizar la readaptación del proceso productivo de buses tradicionales que se lleva a cabo en la planta de uno de los fabricantes líderes del país y dentro del estudio económico-financiero se llevaron a cabo los cálculos de los costos y las inversiones necesarias en capacitación, infraestructura, homologación, capital de trabajo, etc., con el fin de determinar la viabilidad económica del proyecto mediante la aplicación del cálculo del VAN y un posterior análisis de sensibilidad para determinar el impacto en la variación de las variables más críticas.

Por último, para cuantificar los beneficios de la utilización de los buses eléctricos, más allá del beneficio al disminuir la contaminación ambiental, se hizo la comparación del *TCO (Total Cost of Ownership)*, en la que se tienen en cuenta todos los gastos de mantenimiento, combustible etc., del vehículo a lo largo de su vida útil, del bus eléctrico contra el bus de combustión interna.

3. Resultados y principales hallazgos

Estudio de mercado

Para poder proyectar el mercado de los buses eléctricos en la Argentina es imprescindible entender el mercado de buses eléctricos de manera global y cómo fue evolucionando históricamente.

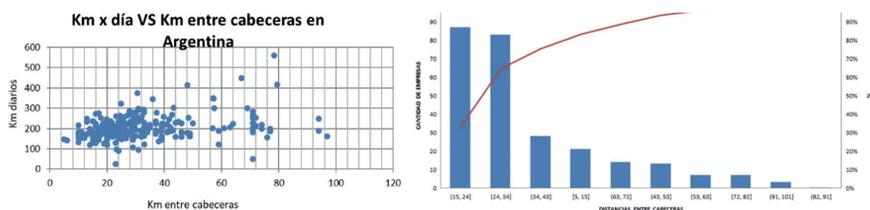
El principal productor y usuario de buses eléctricos del mundo es China, que concentra aproximadamente el 99% del mercado total (aprox. 450.000) al año 2020. Esto se debe a que desde el año 2009 China comenzó a priorizar la electrificación de su sistema de transporte para disminuir la contaminación en las

ciudades, disminuir la dependencia de las importaciones de petróleo y muchas ciudades construyeron sus redes de transporte público desde cero. Por último, una agresiva política de subsidios regionales y nacionales les permitió llevar el costo de capital inicial de un e-bus por debajo de un bus diésel similar, eliminando la principal barrera para la adopción del e-bus.

En el caso de Europa, el mercado de colectivos eléctricos en dicho continente crece de forma veloz, pero a una escala mucho menor comparándola con la del mercado chino. Primero se realizó una prueba piloto, Proyecto ZeEUS, que comenzó en el año 2013 y concluyó en 2018, tuvo como objetivo juntar la mayor información posible para poder determinar la factibilidad de la aplicación eficiente de buses eléctricos para el transporte público urbano. Se pusieron a prueba 110 colectivos (eléctricos puros, híbridos enchufables y trolebuses) con diferentes estrategias de carga a lo largo de 61 ciudades. En total hacia inicios del año 2020, la flota total registrada alcanza aproximadamente las 3000 unidades (incluyendo híbridos y eléctricos).

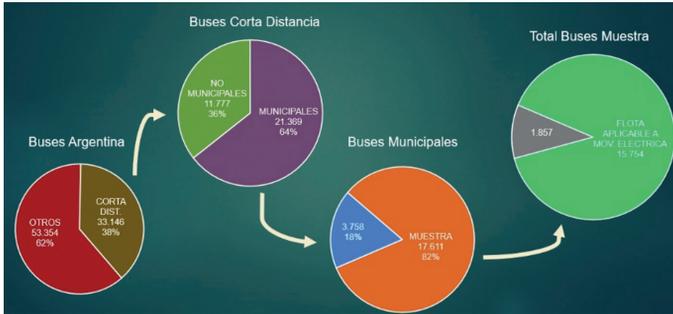
En Sudamérica se resalta a Chile, con el mercado de buses eléctricos más extenso en la región, con 400 unidades que funcionan en Santiago de Chile, todas de origen chino. Las primeras dos unidades comenzaron a funcionar en 2017 como prueba piloto y luego de un año se adicionaron las restantes unidades. También hay que remarcar el caso de Colombia, los buses eléctricos están presentes en las ciudades de Bogotá, Medellín y Cali y suman aproximadamente 100 unidades y se prevé que se expanda al triple en los próximos años. El resto de la región solo presenta pruebas piloto.

En la Argentina lo que primero se analizó es la segmentación entre las distintas denominaciones dentro de la flota de cerca de 80 mil unidades que tiene el país a nivel nacional, entre las que se denotan la de transporte de larga distancia, interurbano, urbano, municipales, etc., de los cuales se descartaron todas las vans y minibuses, como así también los de larga distancia debido a que hoy en día no hay tecnología eléctrica que pueda abastecer este tipo de servicio. Para el análisis, las dos variables fundamentales que se tuvieron en cuenta fueron la distancia que recorren los distintos servicios entre cabeceras y el kilometraje que recorren por día, ya que estas dos son fundamentales para poder definir cuál es la configuración de carga y tamaño del paquete de baterías adecuada.



Se puede observar en el gráfico de dispersión como también en la curva de Pareto que más del 80% recorren menos de 50 km entre cabeceras, como también que en promedio la mayoría recorre alrededor de 200 km diarios.

Del análisis anterior mencionado, y considerando solo la porción de la muestra de la que pudimos obtener información (82%), se desprende que nuestro potencial mercado es de unas 15.754 unidades, ya que las 1.857 unidades restantes no podrían ser abastecidas por la movilidad eléctrica.



Con respecto a la producción en la Argentina contamos con dos empresas que dominan el 98% del mercado, que son Mercedes Benz (con el 49% del *market share*) y Agrale, también con el 49%. La producción de las mismas hoy en día es 100 % diésel, pero se conoce que la marca alemana ya tiene colectivos eléctricos circulando en Europa (bajo el nombre de Cítaró) y también que Agrale tiene en etapa de pruebas, circulando por Reino Unido dos unidades eléctricas.

En cuanto al marco legal en la Argentina cabe destacar que hay decretos que se dictaron en los últimos años, como el N° 311/10 o el N° 51/18, que plantean beneficios arancelarios a las importaciones de vehículos con tecnologías alternativas como así también autopartes para estos, con el fin de impulsar en el país la introducción de nuevas tecnologías.

Estudio técnico

Los componentes principales de un bus eléctrico son el chasis, la carrocería, el tren de potencia (motor, transmisión, diferencial), las baterías, la electrónica de potencia, la electrónica de control y los accesorios. Se analizaron todos los distintos tipos de tecnologías que se utilizan internacionalmente, desde el sistema de almacenamiento hasta la configuración del *power train* y cada uno de sus componentes, intentando definir la mejor elección que cumpla las demandas técnicas del mercado argentino. Las características de las unidades estarán de-

terminadas para satisfacer las normas de CABA (las cuales son más exigentes que en el resto del país). Por ejemplo, una de las características distintivas de los buses que circulan por CABA es el piso *low entry*, un piso único en el mundo que se distingue por tener dos niveles de altura distintos.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los principales componentes que conforman nuestro bus eléctrico (para el dimensionamiento de cada uno de los componentes se realizaron los cálculos correspondientes, que se encuentran en el informe completo):

Motor	Asincrónico trifásico de 250 kw, 3.000 rpm
Configuración del <i>power train</i>	Un único motor central acoplado directamente al diferencial
Baterías de 110 kwh, LiFePO4, 550V	4 módulos de 27,5 kwh, 171 celdas de 50 ah y 3,2 v, densidad: 150 wh/kg
Dirección electrohidráulica adaptada	Motor asincrónico de 5 HP para propulsar la bomba hidráulica original del bus

Para el proceso productivo se decidió realizar las adaptaciones necesarias para producir los buses eléctricos en la misma línea en la que se fabrican los buses diésel, pudiendo fabricar ambos modelos. El ensamblado del bus eléctrico no requeriría modificaciones sobre la línea en la que se produce el bus tradicional, ya que el proceso no difiere ni en los ejes, ni en la cabina de pintura, ni en la cabina de conducción ni en el armado de las ruedas. La variación estaría al llegar al *power train*, ya que en lugar del motor diésel y la caja de transmisión, se instala el motor eléctrico junto con la electrónica de potencia acoplada directamente al cardán. Además, en lugar de instalar los tanques de urea, de combustible y el sistema de enfriamiento para el motor diésel, se instalan las baterías y sus respectivas conexiones.

Estudio económico-financiero

En este capítulo se analizó la viabilidad del proyecto y su rentabilidad desde el punto de vista económico financiero. Cabe destacar que todo el análisis que se realizó en esta sección es marginal, es decir, solo se tomarán en cuenta los ingresos y egresos generados por el proyecto en cuestión (fabricación de buses eléctricos en una planta nacional).

- Se analizó la variación que se percibe en las ventas por vender una determinada cantidad “X” de unidades eléctricas, en lugar de vender esa misma cantidad de buses diésel.

- Se analizó la variación en los costos de mano de obra (MO) debido a la diferencia entre la cantidad de horas hombre (HH) necesarias para fabricar una unidad tradicional y una eléctrica.
- Se evaluó la variación en el costo de la materia prima (MP) debido a los diferentes materiales que se necesitan para fabricar un bus eléctrico y uno tradicional.
- Se analizó la inversión en bienes de uso (BU) necesaria para el proyecto. En este caso, dicha inversión estará compuesta por un cargador eléctrico de 44 kilo-watts y cuatro buses eléctricos. De estos buses, tres son necesarios para ajustar el correcto funcionamiento de la línea de montaje, y al salir de la línea se consideró que no son aptos para la venta. La unidad restante, y cuarto en ser fabricado, será destinado a ensayos de homologación.
- Se tomó como inversión en capital de trabajo (K_{top}) la inversión en un mes de stock de la MP que se fabrica en China y los elementos de seguridad (EPP).

Se tomó un horizonte de evaluación de cinco años. Se ha elegido este período de evaluación de mediano plazo dado que, al tratarse de un producto nuevo en el mercado con tecnología en constante desarrollo (un gran número de los fabricantes se encuentra todavía realizando pruebas piloto con prototipos de distinta configuración de *power train* e, incluso, distinto tipo de baterías) lo más probable es que se requiera una nueva inversión y una revisión de materiales y proceso luego de dicho tiempo. A esto se suma una constante inversión en investigación por parte de países y grandes empresas, sobre todo en el desarrollo de baterías de mayor densidad energética y ciclado, y la búsqueda constante de aumento de la eficiencia de los motores, que indican que un lapso de 10 años para un proyecto de movilidad eléctrica sin sufrir cambios no es una opción válida para seguir siendo competitivos en el mercado.

En el análisis de sensibilidad, *a priori*, se consideró más relevante analizar:

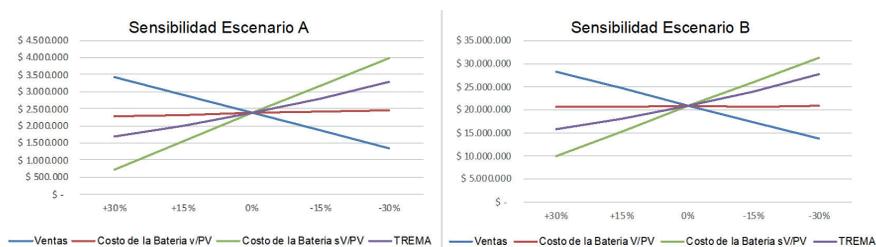
-La variación del precio de las baterías, las cuales representan entre un 30 y un 50% del costo del vehículo y la tendencia actual indica que su precio va a ir disminuyendo año a año. Debido a esta proyección descendente del precio, al no saberse cómo podrían reaccionar los posibles competidores, se decidió asumir que el precio de venta de nuestras unidades descenderá en la misma medida que lo haga el costo de adquisición de las baterías.

-Variación de ventas/ variación del *market share*: como se mencionó anteriormente, partiendo de la hipótesis de que, dado que este es un mercado en desarrollo y un producto nuevo, se asume que se conserva el *market share* del mercado del bus diésel, es decir, un 50%. Desde esta posición, se aumenta y disminuye +- 30% la participación en el mercado.

-Variación de la trama: debido a la compleja situación de la pandemia global que se está viviendo, sumado a la ya difícil situación económica que está

atravesando el país, creemos que esta tasa no va a mantenerse constante los cinco años, sino que en mayor o menor medida esta debería mejorar dado que luego de un período de recesión le sigue un lento proceso de recuperación de la economía.

En los siguientes gráficos se puede observar la sensibilidad de las variables mencionadas:



Como puede observarse en los gráficos de sensibilidad de los dos escenarios, el costo de la batería es la variable que más impacta en el VAN del proyecto frente a una variación, si es que este costo de adquisición no se lo traslada al precio de venta. Si, por el contrario, esa variación, se traslada en la misma magnitud al precio de venta, con el objeto de alguna estrategia de mercado, el impacto sería casi nulo. Sin embargo, dada la poca probabilidad de que el costo de esta aumente en los próximos años, se considerará esta variable de poco riesgo en el proyecto.

Como segunda conclusión, en cambio, sí será de gran importancia el porcentaje de las ventas sobre el *market share* dada la incertidumbre sobre este, del que se desprende que aún con una caída del 30% de las ventas proyectadas el proyecto sigue siendo rentable. Pero cabe destacar que por debajo del 18% de MS el proyecto en el caso que se dé el escenario A deja de ser rentable.

Para cerrar el estudio económico-financiero, con el análisis realizado, podemos afirmar que el proyecto tiene un rendimiento positivo, con una inversión relativamente baja comparada con el volumen de dinero que se maneja en proyectos de esta índole, lo cual es provechoso a la hora de invertir en un mercado de volatilidad económica como el de nuestro país.

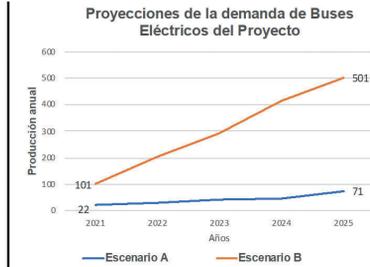
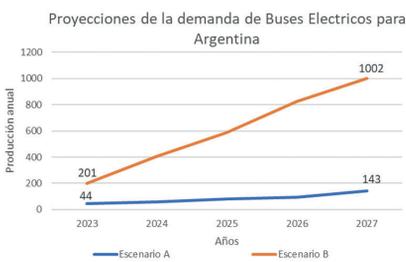
4. Discusión

A la hora de proyectar la demanda de buses eléctricos, debido a que la demanda de buses diésel viene en caída desde hace más de cinco años, y que

esta depende de muchas variables difíciles de predecir, se decidió plantear dos posibles escenarios, uno pesimista el cual definirá nuestro límite inferior y uno optimista para definir el tope máximo esperado.

- **Escenario A:** planteando el mínimo esperado de demanda debido al recambio que se debería dar por la antigüedad de las unidades en la Ciudad de Buenos Aires (la cual es la que demanda el 60% de las unidades producidas en el país) dado que por ley no pueden superar los 10 años. A ese mercado mínimo de buses diésel de la Ciudad se le sumo la porción del resto del país y se le aplicó las penetraciones que se dieron en España, ciudad de Europa con las penetraciones más lentas y con similitudes a las penetraciones de autos eléctricos que se dieron en Sudamérica.

- **Escenario B:** se estableció el límite máximo ideal que se daría si el gobierno de la Ciudad respetará el compromiso que asumió al firmar acuerdo del C40 en París y reemplazara toda la flota por unidades eléctricas. Para simular este recambio se siguió el ejemplo de cómo se dio el reemplazo de la flota total de Londres (ciudad de Europa con la mayor penetración de buses) en los primeros cinco años, que tiene una flota similar y constante como la de la Ciudad de Buenos Aires.



Market share

De esta demanda total proyectada de buses eléctricos se debe definir el *market share* que podría tomar la empresa analizada, empresa que tomamos de ejemplo para estudiar la viabilidad de producir nacionalmente esta nueva tecnología eléctrica. Dado que el parque automotor de buses urbanos permanece constante hace más de 10 años, se toma como hipótesis que las unidades de buses eléctricos que se fabrican se corresponden con las unidades diésel que dejan de fabricarse. Entonces planteamos que como el 99% del mercado está abastecido por solo dos empresas, teniendo ambas el 50%, es de esperar que si una empieza a fabricar buses eléctricos, la otra reaccione de la misma forma para poder seguir manteniendo el MS. Por otro lado, como se mencionó

anteriormente, en Sudamérica existen en circulación aproximadamente 450 buses eléctricos, todos de origen chino. Por lo tanto, si bien no existe hoy en día en la Argentina un competidor instalado, asumimos a los fabricantes chinos como nuestros posibles competidores. Y dada la importancia de este aspecto para el proyecto, se analizará detalladamente en el análisis de sensibilidad la variación del porcentaje del mercado de buses eléctricos que podría tomar la empresa.

5. Conclusiones

El aporte central de este trabajo puede analizarse desde dos puntos de vista importantes para el avance de la movilidad eléctrica en el país. Por un lado, se intentó dimensionar el mercado de buses eléctricos del país y las características técnicas que debía cumplir este y, por otro lado, se analizó la capacidad técnica instalada para corroborar si era factible su producción.

Luego de analizar profundamente el mercado nacional se puede concluir que por lo menos el 73% (15.754 u) de los buses urbanos en circulación en el país se pueden reemplazar por buses eléctricos y ello representaría una enorme disminución en la contaminación de las ciudades.

Por otro lado, se demostró que es viable técnicamente su producción, realizando una adaptación en los procesos productivos actuales y si bien la participación de componentes nacionales en volumen es superior al 80%, no es ese el caso en la participación nacional analizada desde el punto de vista monetaria. Esto es así porque en el caso de las baterías, que en nuestro caso representan el 30% del costo total de la unidad, existen empresas que ensamblan y diseñan en el país las baterías del tipo requerido, pero las celdas son importadas y sería primordial que pudiera avanzarse en una integración nacional más plena, aprovechando así las enormes reservas de los minerales necesarios para construir las baterías que posee nuestro país. También es muy importante, desde el punto de vista de la homologación, que se establezcan normas provenientes de organismos internacionales, como del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), para la certificación de las unidades que cumplen con los requerimientos técnicos establecidos y así protegerse en términos legales y contra la entrada de vehículos importados que no cumplan con las normas vigentes. En este caso, también sería necesaria la inversión en las instalaciones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) para poder realizar los ensayos correspondientes a la homologación de los buses eléctricos nacionales.

Hoy en día la tecnología de carga rápida es una alternativa prometedora frente a las cargas lentas que implican baterías mucho más grandes, ya que permite disminuir las inversiones iniciales, que son la primera barrera que presenta la

incorporación de buses eléctricos. Sin embargo, si el precio de las baterías sigue la tendencia decreciente entonces el escenario podría cambiar.

La Argentina es un mercado con mucho potencial, pero para que este se active se necesita que el gobierno intervenga con ciertas políticas de Estado como incentivos y/o beneficios impositivos para las empresas que se sumen al cambio.

6. Bibliografía

- Asociación española de fabricantes de automóviles y camiones, <https://anfac.com/>
- Asociación Nacional automotriz de Chile, Anuario automotriz 2016-2017, <https://www.anac.cl/wp-content/uploads/2017/11/Anuario-2017.pdf>
- Asociación Nacional de fabricantes de vehículos automotores de Brasil, <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2014.html>
- Asociación Nacional de Movilidad Sostenible, Colombia, <http://www.andemos.org/index.php/cifras-y-estadisticas-version-2/>
- Base mundial de ventas de vehículos por país, <https://carsalesbase.com/>
- “Cantidad de vehículos automotores que prestan servicios públicos de transporte de pasajeros en el ámbito urbano, por jurisdicción”. CNRT (comisión nacional de regulación del transporte), octubre 2016, observatorio nacional de datos del transporte.
- Cordero D. “Metodología para minimizar el consumo de combustible en autobuses mediante reconfiguración del tren motriz”, 2015.
- “Electric Buses in Cities, Driving towards Cleaner Air and Lower CO2”, Bloomberg New Energy Finance, marzo 2018.
- European Alternative Fuels Observatory, 2019, <https://www.eafo.eu/>
- Flota de buses de Londres, por tipo de tecnología, <https://data.london.gov.uk/dataset/number-buses-type-bus-london>
- IEA (International Energy Agency), Hybrid and Electric vehicle technology collaboration programme, <https://www.iea.org/>
- Lajunen A., “Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses” 2016.
- Lajunen, A. “Powertrain design Alternatives for electric city bus”, 2012c.
- “Segundo reporte de Zeus e-bus”, Zero Emission Urban Bus System (ZeUS), 2017.

FACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA CREACIÓN DE UNA FLOTA MIXTA DE BUSES PARA GRANDES URBES. BUSES A ENERGÍA ELÉCTRICA, GNC, BIODIÉSEL, BUSES RECONVERTIDOS DE DIÉSEL A EE/GNC/BIODIÉSEL Y BUSES HÍBRIDOS

Guadalupe Acosta Olano

Resumen

El siguiente estudio muestra cómo hacer uso de variables características de grandes urbes para identificar la forma óptima de planificar la incorporación de nuevas tecnologías a las flotas de buses. Este trabajo se basa en la Ciudad de Buenos Aires, y analiza las tecnologías de buses diésel, a energía eléctrica, GNC, biodiésel, reconvertidos de diésel a energía eléctrica, GNC, biodiésel y buses híbridos. Las variables de contorno que modelan las sensibilidades son: emisiones de CO₂ de cada tecnología, su *Total Cost of Ownership* y la inversión total disponible.

1. Introducción

Este trabajo surge en el marco del Vector de Movilidad Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, propuesto por miembros del INTI y del Ministerio del Desarrollo Productivo de la Nación, siendo de interés para el marco público privado de la Argentina.

La idea transversal de este trabajo es estudiar la creación de una flota de buses conformada por distintos tipos de energías alternativas. Estas energías son energía eléctrica, biodiésel, GNC, híbridos y buses reconvertidos.

Una de las razones de este estudio es el Acuerdo de París, que la Argentina firmó en el año 2015 por el cual se compromete a realizar los esfuerzos necesarios para ponerle un techo de 1.5 °C al calentamiento global desde niveles pre-industriales y así reducir los riesgos del cambio climático.

En este contexto, nuestro país presentó su Contribución Nacional Prevista (INDC, por sus siglas en inglés) que implica un esfuerzo de reducir en un 18% las emisiones proyectadas para el 2030. Para lograr estos objetivos en 2017 se presentaron tres planes nacionales de mitigación uno de los cuales se refiere

al transporte, que representa un 15% de las emisiones totales: Plan de Acción Nacional de Transporte y Cambio Climático (PANTCC). En este, el objetivo de reducción de emisiones alcanza las 5.9 millones de toneladas equivalentes de CO₂ para 2030, y para cumplirlo se propone una serie de medidas entre las que se encuentran la priorización del transporte público y el desarrollo de la movilidad baja en emisiones. De acuerdo con estimaciones, solamente la electrificación de las líneas de jurisdicción nacional contribuiría a reducir unas 0.78 millones de toneladas equivalentes de CO₂ al año, un 13.4% del objetivo del PANTCC.

Como consecuencia del PANTCC se crea el Vector de Movilidad Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires en el año 2018. Este Vector se encarga de investigar y desarrollar estudios de índole energética, cuyas conclusiones sirven para distintos ámbitos públicos como, por ejemplo, confección de planes de acción para la movilidad urbana, trazado de mapas de electrificación, manejo de desechos eléctricos, entre tantos otros.

El estudio comenzó con un análisis situacional de las pruebas piloto llevadas a cabo en Buenos Aires y un relevamiento de información de toda la flota de buses del AMBA. A partir de esto, se generó una clasificación de esta según cuatro categorías, a modo de poder compartimentar cualquier decisión que se tome a futuro. Las clases quedaron definidas según tipo de recorrido, permitiendo tener categorías homogéneas entre sí, pero con características muy distintas en cuanto a velocidad media, distancia entre cabeceras y tiempo en ralentí.

Se trabajó en conjunto con el gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (GCBA) relevando datos empíricos de CABA que permitieron simular los escenarios con datos que la misma ciudad arrojó, enriqueciendo las conclusiones obtenidas al final de este estudio. Se calcularon los *Total Cost of Ownership* (TCO) de cada tecnología y las emisiones contaminantes de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

Tras realizar lo anterior, se procedió a modelizar linealmente estos factores y confeccionar un tablero de decisión que permite modificar coeficientes y tras la simulación, arroja un resultado óptimo de cuántos buses a cada tecnología sugiere tener, manteniendo siempre un lineamiento económico y de reducción de la contaminación ambiental. Este estudio de optimización se lleva a cabo mediante el *software* de programación lineal LINDO.

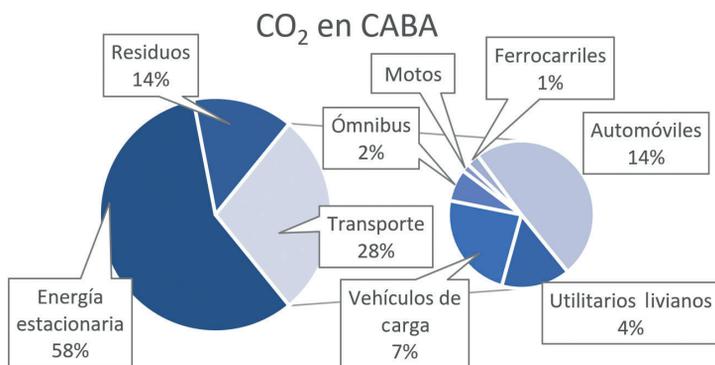
Esta herramienta permite realizar sensibilidades y estudiar qué tecnología conviene impulsar, cómo otorgar subsidios, analizar el impacto de variaciones de costos e inversiones, entre tantos otros análisis.

2. Metodología

Como ciudad de análisis se eligió la Ciudad Autónoma de Buenos Aires debido a las numerosas pruebas piloto que se están llevando a cabo con energías alternativas y porque es la ciudad de la Argentina con mayor población y mayor densidad de buses.

Es importante entender el contexto actual y enmarcarlo en el Plan de Movilidad Limpia impulsado por la ciudad. A continuación, se muestra un gráfico proporcionado por el GCBA, en el que se ilustra cuáles son los principales agentes contaminantes del transporte en la Ciudad y cuánto contribuyen de CO₂.

Figura 1. Contaminación de CO₂ en CABA



Fuente: Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Como se puede observar, un porcentaje considerable de la contaminación es causada por los buses de la ciudad, lo cual confirma que la implementación de energías alternativas es necesaria para mitigar este problema.

Se usaron datos relevados de las pruebas pilotos con energías alternativas realizadas en CABA como *input* al modelo y esto también permitió clasificar la flota total de buses en cuatro categorías con características homogéneas, facilitando así la estratificación del análisis y la futura toma de decisiones.

A continuación, se definen las variables creadas y se muestran las conclusiones de la caracterización de las cuatro clases evaluadas en cada tecnología estudiada en este trabajo.

Tabla 1. Definición de variables de tecnología y clase

T1	Tecnología 1: Diésel
T2	Tecnología 2: EE
T3	Tecnología 3: R. D/EE
T4	Tecnología 4: Bio
T5	Tecnología 5: R. D/Bio
T6	Tecnología 6: GNC
T7	Tecnología 7: R. D/GNC
T8	Tecnología 7: Híbridos
C1	Clase 1
C2	Clase 2
C3	Clase 3
C4	Clase 4

Fuente: elaboración propia.

T_i: tecnología i (i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)

C_j: clase j (j: 1, 2, 3, 4)

X_{ij}: cantidad de buses de la tecnología i (i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) que pertenecen a la clase j (j: 1, 2, 3, 4)

EE_{ij}: emisión de CO₂eq de la tecnología i (i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) que pertenecen a la clase j (j: 1, 2, 3, 4)

CUNIT_{ij}: costo unitario correspondiente a un bus funcionando con la tecnología i (i: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) que pertenece a la clase j (j: 1, 2, 3, 4)

Tabla 2. Resumen de emisiones contaminantes según tecnología y clase

ton CO₂/año	C1	C2	C3	C4
EE1	54	81	107	114
EE2	20	30	40	43
EE3	20	30	40	43
EE4	28	42	56	60
EE5	28	42	56	60
EE6	50	75	100	106
EE7	50	75	100	106
EE8	40	60	80	85

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Costo de cada flota

KUSD/año	C1	C2	C3	C4
CUNIT1	28	42	56	59
CUNIT2	37	56	75	80
CUNIT3	24	36	48	51
CUNIT4	30	45	60	63
CUNIT5	30	45	60	63
CUNIT6	30	45	60	64
CUNIT7	23	34	46	49
CUNIT8	29	44	59	63

Fuente: elaboración propia.

Estas variables y sus coeficientes se usan como *input* de la modelización. Se decidió trabajar con el *software* LINDO debido a su simplicidad de escritura y el gran espectro de análisis *post* optimal que permite realizar.

Es importante abordar esta parte del análisis recordando que se apunta a generar un modelo para la toma de decisiones que permita ir modificando las variables de entrada y analizar las variaciones que se generan tanto en temas económicos como ambientales, que son el foco de este estudio.

Es necesario entender qué es lo que se va a plantear. A continuación, se cita una breve explicación del libro del Ing. Miranda *Programación lineal y su entorno*:

Los modelos de decisión, también llamados optimizantes, son aquellos que formulan una función objetivo a maximizar o minimizar. La resolución de estos problemas consiste en determinar el valor (o nivel de actividad) que deben tener las variables para alcanzar el mejor valor de la función objetivo.

Un programa matemático en el cual todas las restricciones y el funcional son funciones líneas es un programa lineal. Normalmente, en los problemas lineales se da la condición de no negatividad de las variables. En consecuencia, un problema lineal queda formulado matemáticamente de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar una función del tipo } \sum c_j \cdot x_j \\ & \text{Sujeto a un conjunto de restricciones del tipo } \sum a_{ij} \cdot x_j \leq b_i \\ & \text{Siendo las } x_j \geq 0 \end{aligned}$$

Los parámetros c_j que afectan a las variables en la función objetivo se conocen con el nombre de coeficientes del funcional, los parámetros a_{ij} que afectan a las variables en las condiciones de vínculo se denominan coeficientes tecnológicos y los parámetros b_i se llaman términos independientes o RHS (del inglés *right hand side*).

Una vez que se tiene una idea del tipo de modelización que se va a realizar, se confecciona el caso base. El caso base brinda una solución inicial, también conocida como “semilla”, debido a que sirve como una primera solución, que luego podrá ser refinada para obtener un mejor entendimiento situacional.

3. Resultados y principales hallazgos

Por lo que se pudo ver de los escenarios de sensibilidad planteados, la energía eléctrica es la tecnología en la cual hay que poner los mayores esfuerzos para implementar, debido a su baja contaminación y mayor requerimiento de inversión en infraestructura. Si bien las proyecciones económicas indican que el TCO de los buses eléctricos será competitivo con el del diésel en cuestión de unos pocos años, se recomienda estudiar la posibilidad de acelerar este proceso otorgando subsidios, creando convenios con empresas fabricantes, invirtiendo en investigación, entre tantas otras formas.

Para poder cumplir la meta de reducción de contaminación hay varios caminos que se pueden tomar, algunos permiten llegar a la meta más rápidamente y otros implican una planificación escalonada, lo cual es más realista. Se recomienda también el cambio al combustible biodiésel, por su facilidad de implementación y automática reducción de contaminación. Además, la Argentina es un país productor de soja, maíz y distintos desechos orgánicos de los cuales podría llegar a obtenerse este combustible, apalancando así también el crecimiento industrial del país.

4. Discusión

Como se puede ver a lo largo de este estudio, hay múltiples formas de cumplir la meta impuesta de reducir en un 18% las emisiones proyectadas para el año 2030.

Esta herramienta permite simular infinidad de escenarios posibles y tomar decisiones que contemplen la inversión disponible, tiempos de recambio de la

flota y valores de contaminación a la cual se aspira. Si bien los coeficientes de las variables ingresados en este código modelan a la Ciudad de Buenos Aires, esta simulación puede ser utilizada para cualquier otra urbe de la cual se tenga datos característicos.

5. Conclusión

La Argentina es un país con un gran potencial de crecimiento y liderazgo energético, abundan las posibilidades de actuar de forma más amigable ambientalmente y es cuestión de canalizar los esfuerzos en relajar brechas económicas para poder empezar a implementar estas nuevas formas. La intención de este trabajo profesional es permitir identificar aquellos puntos en los que es óptimo enfocarse, para luego llevar todos estos planes a acciones.

6. Bibliografía

- Miranda, Miguel: *Programación lineal y su entorno*, Segunda Edición Actualizada, Buenos Aires, Editorial de la Universidad Católica Argentina, 2003.
- Garros, Milagros, Orbaiz, Pedro, Movsichoff, Constanza, Agulló, Juan, Rivera Parejas, Julián, Cosentino, Santiago, Oxenford, Nicolás y Aguirre, Santos, *Prueba Piloto de Buses de Combustibles Alternativos* – Ciudad de Buenos Aires, 2020.
- Orbaiz, Pedro, van Dijk, Nicolás, Cosentino, Santiago, Oxenford Nicolás, Carrignano, Mauro y Nigro, Norberto Marcelo, *A Technical, Environmental and Financial Analysis of Hybrid Buses Used for Public Transport* – Ciudad de Buenos Aires, 2018.

FACTIBILIDAD DE FABRICACIÓN DE COMPONENTES LOCALES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA CADENA DE VALOR DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN TRANSPORTE PÚBLICO. ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Ramiro Sicardi y María Eugenia Wasyluk

Resumen

Este trabajo propone, a partir de un trabajo anterior en el que se analizó la factibilidad de fabricación local de colectivos eléctricos en la Argentina, hacer un relevamiento de la capacidad instalada en el país para llevar a cabo ese propósito. Además, pretende adentrarse en la eficiencia energética de los colectivos eléctricos haciendo foco en el sistema de frenado regenerativo, un sistema que les permite a los vehículos eléctricos recuperar parte de la energía consumida, que normalmente sería disipada al ambiente en forma de calor.

Se puede ver que la capacidad instalada en la Argentina es muy dispar entre lo que es la fabricación de colectivos tradicionales (a combustión interna), que está trabajando a un cuarto de su capacidad instalada y los componentes necesarios para fabricar buses eléctricos, que apenas hay capacidad para abastecer los escenarios de demanda más conservadores en los próximos cinco años, pero muy lejos está de alcanzar para los escenarios más optimistas que contemplan los compromisos ambientales que ha firmado la Argentina con el mundo.

Por último, se describe el amplio impacto que tiene la implementación de un sistema de frenado regenerativo completo y sofisticado en todos los actores del mercado: consumidores, productores y el ambiente.

1. Introducción

Origen - Vector Movilidad Eléctrica

El presente trabajo se encuentra desarrollado bajo el marco del proyecto interdisciplinario del Vector Movilidad Eléctrica, Proyecto Vectores, acercado por la cátedra de Trabajo Profesional de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (UBA). El trabajo tiene su

origen desde el Vector de Movilidad Eléctrica, compuesto por los siguientes programas:

1. *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Transporte (PIUBAT)*, enfocado al transporte general en Argentina.
2. *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Cambio Climático (PIUBACC)*, enfocado en las emisiones de contaminantes y su impacto en el cambio climático.
3. *Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Energía Sustentable (PIUBAES)*, enfocado en la generación, distribución y almacenamiento de la energía.
4. *Programa Interdisciplinario de la UBA para el Desarrollo (PIUBAD)*, enfocado en los distintos tipos de modalidades de transporte urbano

El tema de nuestro trabajo corresponde a la continuación del realizado por los ingenieros Joaquín Chazarreta, Mariela Chhab y Patricio Priano titulado “Factibilidad Técnica y Económica de la Producción Nacional de Buses Eléctricos”, en el cual se realizó un estudio de factibilidad de la producción nacional de buses completamente eléctricos, haciendo foco en los componentes de carrocería y chasis del bus.

Objetivo

Este trabajo presenta dos objetivos. Por un lado, contribuir a la generación de una cadena de valor de colectivos eléctricos a través del análisis de factibilidad de fabricación nacional de sus componentes. Por otro lado, buscar optimizar el consumo energético del bus eléctrico presentado en el trabajo anterior validando los componentes seleccionados.

Alcance

En este trabajo se realizó un relevamiento de mercado de los principales componentes de un autobús eléctrico, para conocer en mayor profundidad la situación del país en cuanto a la capacidad instalada de producción local de vehículos de este tipo. Luego se analizó en mayor profundidad el sistema de Frenado Regenerativo y su factibilidad de producción local, con la posterior integración de este a la cadena de ensamblaje del colectivo en fábrica. En este informe se pretenden mostrar los resultados y conclusiones más importantes.

El trabajo anterior había diseñado un colectivo eléctrico con las siguientes características, que servirá como punto de partida para este trabajo:

- Colectivo eléctrico de 12 m de longitud con piso *Low Entry*
- Para uso en ciudad
- Fabricado en empresa local
- Motor: Asíncrono; 200 kW
- Sistema de almacenamiento de energía: Baterías de litio (*LFP*); 110 kWh
- Autonomía: 53 km
- Los cargadores se instalarán en las cabeceras, que será el único lugar donde se cargarán los colectivos.

2. Metodología

Las principales fuentes de este trabajo fueron la búsqueda de presentaciones académicas e información fidedigna a través de internet y las consultas a expertos y referentes del mercado de movilidad eléctrica. Gran parte de nuestro trabajo fue validar esta información encontrada proveniente de distintos lugares y entender si la aplicación de los casos estudiados a nivel mundial podría ser viable en la industria actual de la electromovilidad y en nuestro país en particular.

Dentro de las fuentes consultadas, se encuentran referentes de empresas fabricantes de componentes de buses diésel en la Argentina (hoy en día no se fabrican buses eléctricos en nuestro país a nivel industrial), referentes de empresas fabricantes de componentes que serían parte de los buses eléctricos (motores eléctricos, baterías y componentes electrónicos) y expertos de los diferentes rubros y tecnologías involucradas, que nos permitieron tener una mirada actual de la situación y las tendencias.

Por otro lado, para analizar la viabilidad técnica y económica de fabricación local de colectivos eléctricos con la mejora en su eficiencia, tomamos como ejemplo a uno de los principales referentes en fabricación de chasis en la Argentina.

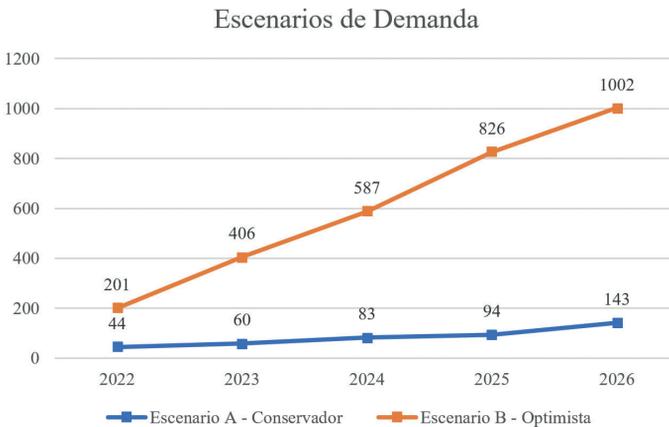
Finalmente, una de las principales fuentes que inspiró este trabajo a buscar el objetivo de mejora en eficiencia energética fue la publicación presentada con los resultados de la Prueba Piloto de la Línea 59 [7], que consistió en traer dos unidades eléctricas de China para probar su funcionamiento en el recorrido urbano de la empresa en Buenos Aires. En ese informe, se vio que el uso del Freno Regenerativo en el colectivo llevó a una mejora energética del 41%, durante el plazo que duró la prueba piloto (mayo 2019 a mayo 2020).

3. Resultados y principales hallazgos

Análisis de capacidad instalada para fabricación de colectivos eléctricos en la Argentina

Antes de indagar en la capacidad instalada para la fabricación de componentes para un colectivo eléctrico, debemos entender cómo se va a comportar la demanda del potencial mercado hallado en el trabajo que nos precede. Para eso, como bien se explicó en el trabajo anterior, se presentan dos escenarios de demanda, uno conservador y otro optimista, que dieron como resultado estas demandas proyectadas:

Figura 1. Escenarios de Demanda proyectada



Fuente: “Factibilidad técnica y económica de la producción nacional de buses eléctricos”, Chazarreta, Chhab, Priano.

El análisis más detallado se puede ver en el trabajo “Factibilidad técnica y económica de la producción nacional de buses eléctricos” de los ingenieros Chazarreta, Chhab y Priano.

Teniendo esa posible demanda en cuenta, procederemos al análisis.

Los principales componentes de un colectivo eléctrico son compartidos en su mayoría con los de un colectivo tradicional, que es propulsado por un motor diésel por lo general. Unos pocos componentes son los que hacen a un colectivo eléctrico. Pasaremos a listarlos y a hacer la distinción correspondiente:

- Chasis
 - Eje delantero
 - Eje trasero
 - Suspensión
- Carrocería
- Ruedas
- Aire acondicionado
- Electrónica de control
- Motor eléctrico
- Batería eléctrica

Los primeros cuatro puntos son comunes a un colectivo tradicional y a uno eléctrico, mientras que los últimos dos corresponden únicamente a un colectivo eléctrico. El componente “Electrónica de control” va a estar presente en cualquiera de las tecnologías, pero va a estar compuesto por módulos diferentes que van a tener funcionamientos muy distintos según el tipo de colectivo. Es importante hacer esta distinción ya que, al analizar la capacidad de fabricación de estos componentes, hay que conocer si la demanda de colectivos eléctricos generaría nueva demanda de ciertos componentes o no.

Pasaremos a analizar los componentes comunes a ambos colectivos y en este caso vamos a hablar de capacidad instalada como la capacidad que responderá a la eventual demanda de colectivos eléctricos. Usaremos el término “capacidad instalada”, ya que la demanda de un colectivo eléctrico reemplazará la demanda de uno tradicional: tomamos como hipótesis que el mercado de colectivos urbanos de la Argentina se mantendrá constante como viene sucediendo hace casi una década, por lo que no se generará nueva demanda en el mediano plazo.

Tabla 1. Capacidad instalada para la fabricación de componentes comunes a un colectivo diésel y uno eléctrico.

	Principales productores en la Argentina	Capacidad instalada	Demanda proyectada máxima de colectivos eléctricos	Unidades
Chasis y carrocería	Agrale, Mercedes Benz, TodoBus, Ugarte, Tatsa	7.000	1.002	colectivos/año
Neumáticos	Pirelli, Bridgestone, Fate	12.000	1.002	colectivos/año
Aire acondicionado	Colven, Climabus	2.000	1.002	colectivos/año

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, la capacidad instalada que hay en el país para la fabricación de estos componentes excede la eventual demanda proyectada para los colectivos eléctricos.

Procederemos a analizar la capacidad ociosa que hay en el país para fabricar los otros componentes que son propios de un colectivo eléctrico. A diferencia de los componentes anteriores, en este caso hablamos de capacidad ociosa ya que hoy en día, los productores que fabrican estos componentes dedican su capacidad a otros productos. Por ejemplo, DAFA fabrica, entre otras cosas, el motor para el auto eléctrico Sero Electric. De querer comenzar a fabricar motores eléctricos para un colectivo urbano, no dejaría de producir ese otro motor. Por lo tanto, solo la capacidad instalada que hoy no está siendo utilizada en estas empresas podría ser destinada a la fabricación de los componentes para el colectivo eléctrico.

Tabla 2. Capacidad ociosa para la fabricación de componentes propios de un colectivo eléctrico

	Principales productores en la Argentina	Capacidad ociosa	Demanda proyectada máxima	Unidades
Motor eléctrico (inducción)	DAFA, Czerweny	120	1.002	colectivos/año
Baterías	VZH, Sol.Ar, Coradir S.A.	135	1.002	colectivos/año
Componentes electrónicos	Mirgor, Coradir S.A.	9.000	1.002	colectivos/año
Pedalera electrónica	Importado de Brasil	-	1.002	colectivos/año

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver, a diferencia del análisis anterior, en este caso, habría un cuello de botella en la actual capacidad ociosa de motor eléctrico y baterías.

Consultando con los principales productores, pudimos conocer que de haber una demanda más firme de estos componentes o de tener un horizonte con mayores certezas, ellos estarían dispuestos a invertir para que la capacidad instalada actual pueda ampliarse para poder llegar a abastecer esa potencial demanda, o al menos algún escenario de demanda intermedio entre la máxima esperada y la estimación más conservadora. Sin embargo, debido a las pocas garantías que

ofrece hoy en día nuestro país, tanto en materia económica como institucional y regulatoria, es difícil para los productores estar dispuestos a hacer una inversión que necesita años en recuperarse y, por ende, tiene resultados poco previsibles. Es por eso que el rol del Estado es clave para la penetración de la electromovilidad, principalmente dando certezas al mercado. Hasta el día de hoy no ha dado señales del todo claras.

Análisis de eficiencia del colectivo eléctrico: frenado regenerativo

El sistema de frenado regenerativo, o simplemente freno regenerativo (FR), es un sistema que utiliza los componentes presentes en un vehículo eléctrico para aprovechar la energía cinética que tiene el vehículo en movimiento y transformarla en electricidad al frenar el vehículo. No es una pieza que se agrega al vehículo, sino que, mediante el trabajo en conjunto del sistema de almacenamiento de energía, el motor-generator, los controladores electrónicos y el pedal de freno, se puede tomar esa energía, transformarla en electricidad y almacenarla. Un colectivo eléctrico haciendo un recorrido urbano puede recuperar al menos un 37% de la energía eléctrica que consume gracias al FR.

Si bien la mejora que presenta el FR es netamente una mejor eficiencia energética, podemos ver un impacto en tres áreas:

- **Autonomía:** gracias a una reducción del consumo energético, permite aumentar la autonomía de un colectivo eléctrico urbano en al menos 37%. A su vez, esto permite agrandar el mercado que puede electrificarse a aquellos colectivos que sin esta mejora en autonomía no podrían recorrer la distancia entre las cabeceras de su línea, donde se instalarían los cargadores.
- **Económica:** estas ventajas pueden ser tanto para los consumidores (dueños de los colectivos eléctricos) como para los productores. Para los consumidores, los gastos operativos en electricidad en un colectivo urbano en la Argentina sin FR son 37% mayores que los de uno sin FR. Para los productores, la mejora en consumo energético podría permitir que se reduzca el tamaño de las baterías hasta un 27%, pero aun manteniendo la misma autonomía que un bus sin FR. Las baterías representan entre un 25- 30% del costo de los componentes del bus.
- **Ambiental:** si bien un vehículo eléctrico no emite gases de efecto invernadero, la generación de energía para alimentarlo sí (aproximadamente el 60% de la energía eléctrica generada en la Argentina proviene de fuentes térmicas). La implementación del FR reduce estas emisiones un 27%.

4. Discusión

Como se mencionó, este trabajo se basa en un trabajo anterior y remarca dos puntos importantes sobre lo planteado en él. El primero es si más allá de la viabilidad técnica de producir un bus eléctrico en la Argentina, hay capacidad realmente para hacerlo y dónde debe ponerse el foco para desarrollarla. La respuesta es sí, pero deben desarrollarse dos puntos clave: baterías y motores.

El segundo punto es la importancia que tiene el sistema de FR en todo el mercado y lo fundamental que es tenerlo en cuenta a la hora del diseño de un bus eléctrico urbano en la Argentina. En el trabajo “Factibilidad técnica y económica de la producción nacional de buses eléctricos” de los ingenieros Chazarreta, Chhab y Priano, el FR era considerado un elemento secundario. Sin hacer modificaciones sobre los elementos seleccionados, podía usarse este FR precario para recuperar hasta un 10% de la energía. Vimos que vale la pena tomarse el trabajo de agregar o mejorar ciertos componentes del colectivo para lograr recuperar 37% de la energía, ya que los beneficios que se obtienen son muy importantes. Puede verse en el trabajo completo que los beneficios superan los costos de implementación de este sistema.

Proyecto de Ley de MS

Es importante remarcar que es fundamental para el desarrollo de la electromovilidad contar con apoyo estatal. En los últimos años, hubo algunas acciones para llevar adelante la electrificación de los vehículos en la Argentina y entre ellos, los colectivos. Tal es el caso de la prueba piloto mencionada anteriormente. A pesar de esto, sin la presencia de un marco legal que inste a la industria a realizar un cambio, se ve muy utópica una Argentina con colectivos eléctricos en el mediano y largo plazo.

Cabe destacar el Proyecto de Ley de Movilidad Sustentable, lanzado en el año 2020 [9], que, de ser ley, traería grandes incentivos para la electrificación de vehículos en la Argentina, tanto particulares como de transporte de pasajeros. Dentro de los puntos de este proyecto de ley, destacamos y comentamos algunos a la luz de los hallazgos de este trabajo.

En el proyecto se plantea que para 2041 ya no se puedan fabricar más vehículos a combustión interna (VCI). Sin embargo, no se habla sobre el tamaño del mercado automotor que se quiere tener. Hoy en día se patentan alrededor de 700 000 vehículos por año en la Argentina (livianos y pesados) y la capacidad para fabricarlos que tiene el país es de hasta 750 000 unidades por año aproximadamente. Inhibir la oferta de VCI sin fomentar una alternativa podría comprimir enormemente el mercado automotor, que es una fuente importante

de trabajo y divisas en el país. Por lo tanto, es fundamental que esta limitación no ponga en jaque todo lo positivo que aporta esta industria de un enorme valor agregado a los argentinos.

Otro punto a tener en cuenta es la ventaja fiscal que tendría realizar el cambio de una unidad tradicional a una eléctrica. Se plantea un plan de beneficios a lo largo del tiempo, hasta el 2040, cuando aquellas empresas o consumidores que ingresen al mundo de la electromovilidad obtendrán un 100, 66 o 33% de los beneficios establecidos por la ley, dependiendo del momento en que lo hagan (los que ingresen en los primeros ocho años de presentada la ley, obtendrán el 100% de los beneficios, y este porcentaje se irá reduciendo en el tiempo hasta el 2040).

Otro punto que se propone es la creación de un fondo para financiar distintos emprendimientos relacionados con la movilidad eléctrica, el Fondo Fiduciario de Movilidad Sustentable (FoDeMS). Una de las propuestas que se pueden hacer a partir de los resultados de este trabajo es que esos fondos se asignen fundamentalmente a las principales limitantes para el crecimiento de la electromovilidad, que son la producción de baterías y motores eléctricos nacionales.

El futuro del vector de movilidad eléctrica

A partir de lo discutido en este trabajo se desprenden otros temas que serían importantes para desarrollar en trabajos e investigaciones futuras. Parte del propósito del vector de movilidad eléctrica es dar un marco para que se genere esta continuidad y sinergia entre los diferentes participantes y así poder acelerar e impulsar este cambio hacia una movilidad más eficiente y limpia.

Partiendo de esta investigación, creemos que se desprenden varios temas para trabajar. Primero, el desarrollo de fábricas de baterías de litio. Los fabricantes de baterías que hay en la Argentina importan celdas y las sueldan en el país para formar los distintos módulos de las baterías según la necesidad particular del cliente, con cierto trabajo de ingeniería detrás. Sin embargo, la Argentina posee una de las reservas de litio más grande del mundo, que esparte del llamado Triángulo de Litio, por lo que un avance importante y una oportunidad enorme es la de fabricar electrodos y celdas nacionales evitando la necesidad de importarlas. Se está hablando mucho de esto en el país, pero realmente implementarlo requiere una alta inversión y un firme compromiso, además de grandes recursos tecnológicos.

Como se mencionó anteriormente, este trabajo se basó en un colectivo con una batería de 110 kWh. Esto permitió tomar casi la totalidad del potencial mercado electrificable de colectivos eléctricos que consideramos, atado a la autonomía permitida por el tamaño de la batería. Claramente, si se escogiera una

batería mayor, se podría llegar a abarcar a todo el mercado, pero surge otro problema, y es el de la capacidad ociosa disponible actualmente para fabricar baterías en el país, además del costo que implicaría una batería más grande. Un mayor tamaño de batería implicaría una menor cantidad de unidades de colectivo que podrían producirse, con lo cual sería menor la demanda abastecida. Este análisis es muy interesante y creemos que debe realizarse en mayor profundidad, ya que la batería es uno de los principales componentes del colectivo eléctrico.

Al igual que las baterías, desarrollar la capacidad de producción en nuestro país de motores eléctricos para vehículos, es crucial para el desarrollo de esta industria en la Argentina. A diferencia de las baterías, en el país hay fábricas de motores eléctricos para otras aplicaciones industriales, por lo que las inversiones necesarias serían menores y se parte de una base establecida más sólida.

No debemos dejar de mencionar que, según datos de CAMMESA, en el 2020 la matriz energética de la Argentina era en un 60% térmica, es decir, la energía utilizada en el país proviene de fuentes que generan gases de efecto invernadero (GEI) que contaminan al ambiente. Si realmente se quiere hacer un cambio en materia ambiental, no basta con modernizar los vehículos y electricificarlos, ya que la energía con la que se cargarían sus baterías hoy sería todavía contaminante en la Argentina. Contar con energías renovables como fuentes de energía es crucial para seguir el camino hacia un planeta con un menor porcentaje de emisiones.

5. Conclusiones

A lo largo de esta investigación, logramos cumplir con los principales objetivos planteados.

Por un lado, en lo que respecta a la viabilidad de producción local, pudimos observar que existe viabilidad técnica y tecnológica para la producción de colectivos eléctricos, con más del 65% de integración nacional. De esta manera, se podrían impactar a un gran número de empresas, entre ellas cabe mencionar: Agrale, Mercedes-Benz, Todobus, Ugarte, TATSA, Fate, Bridgestone, Pirelli, Colven, Climabus, Coradir, Mirgor, DAFA, Czerweny, VZH y Sol.Ar. Sin embargo, hay un largo camino por recorrer para que esa viabilidad se convierta en una oferta significativa para lo que demandaría el mercado argentino.

En lo que respecta a nuestro segundo objetivo, de la mejora en materia energética y la eficiencia del colectivo eléctrico, pudimos ver que el FR puede llevar a una mejora de al menos un 37% en el consumo de energía. Esto no solo representaría una mejora en autonomía, uno de los principales puntos en contra que

tiene un vehículo eléctrico, sino que también implicaría una mejora económica para los consumidores, ya que necesitarían menos energía para realizar sus recorridos. Además, se presenta en el trabajo completo el análisis de viabilidad económico-financiera de esta implementación por parte de los productores de buses y puede verse que también es conveniente por ese lado.

Algunas otras conclusiones del trabajo son las siguientes:

Después de una validación de los componentes seleccionados en el trabajo anterior, agregando como variable a considerar la efectividad para aplicación del FR, sin dejar de lado la viabilidad económica y técnica de hacerlo en Argentina, se recomienda para los primeros pasos de la electromovilidad en el transporte público urbano en la Argentina un colectivo con las siguientes características:

- Colectivo eléctrico de 12 m con piso *Low Entry*
- Para uso en ciudad
- Fabricado localmente
- Motor: Asíncrono; 200 kW
- Sistema de almacenamiento de energía: Baterías de litio (*LFP*); 88 kWh o 110 kWh
- Autonomía: 53 km o 66 km (según tamaño de batería)
- Los cargadores se instalarán en las cabeceras, que será el único lugar donde se cargarán los colectivos.
- Con sistema de FR

La implementación y sofisticación del FR hasta una recuperación del 37% trae como beneficio secundario el aumento del tamaño del mercado. Al agrandar la autonomía, el FR permite efectivamente electrificar el 92% (16.242 unidades) de todo el parque automotor electrificable *a priori*, mientras que sin el FR puede atacarse solo el 87% (15.294) y con el FR al 10% del trabajo anterior, un 88% (15.572). De cierta forma, tener un mercado más grande también mejora los incentivos para que los productores inviertan en estos productos, por lo que la implementación del FR es fundamental.

6. Bibliografía

- [1] Banco Mundial: “Lecciones de la experiencia chilena con la electromovilidad - Integración de E-Buses en Santiago”, Banco Mundial, 2020.
- [2] Berdichevsky, Gene; Yushin, Gleb: “El Futuro del almacenamiento de Energía - Hacia una batería perfecta con escala global”, *Sila Nanotechnologies Inc.*, 2020.

- [3] Castilloux, Ryan: “Spotlight on dysprosium - Revving Up for Rising Demand”, *Adamas Intelligence*, 2018.
- [4] Chazarreta, Joaquín; Chhab Mariela; Priano, Patricio: “Factibilidad Técnica y Económica de la Producción Nacional de Buses Eléctricos”, Buenos Aires, Eudeba, 2021.
- [5] Diez Olleros, Íñigo: “Tecnología de los volantes de inercia”, *Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía*, 2018.
- [6] Hanejko, Fran: “Induction vs. Permanent Magnet Motor Efficiency - Auto Electrification”, *Horizon Technology*, Pensilvania, 2020.
- [7] Hincio; Equipo Sistemas Sustentables; CAF: “Resultados del piloto de buses eléctricos en Buenos Aires - Tecnologías alternativas en el transporte público”, Buenos Aires, CAF, 2021.
- [8] Mastronardi, Leonardo J.: “Inserción de vehículos eléctricos en los Escenarios Energéticos 2030”, Dirección Nacional de Escenarios y Evaluación de Proyectos Energéticos - Subsecretaría de Planeamiento Estratégico, Argentina, 2019
- [9] Ministerio de Desarrollo Productivo de Argentina: “Proyecto Ley de Movilidad Sustentable”, Argentina, 2020.
- [10] Oficina de eficiencia energética y energía renovable, EE. UU. (2021): “Adonde va la energía: Autos Eléctricos”. FUELECONOMY. *Agencia de Protección Ambiental*. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv-ev.shtml>.
- [11] Pellegrino, Gianmario; Vagati, Alfredo; Boazzo, Barbara; Guglielmi, Paolo: “Comparison of Induction and PM Synchronous motor drives for EV application including design examples”, Turín, Politecnico di Torino.
- [12] Pérez Rioja, Mario: “Estudio de un sistema de recuperación de energía para camiones”, Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, 2017.

DESARROLLO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ARGENTINA

Facundo Jurado y Irina Winokur

Resumen

La siguiente investigación fue desarrollada como trabajo final de ingeniería industrial de los autores en el marco del Proyecto Vectores, temática movilidad eléctrica. Aborda un relevamiento de la situación actual de la industria de vehículos eléctricos en la Argentina, mediante un ejercicio de evaluación de mercado, técnica y financiera de un hipotético proyecto de fabricación local y comercialización de un *city car*/utilitario. Se estimó y proyectó el tamaño del mercado para los próximos años, en función de un ejercicio comparativo por escenarios, para los segmentos de *city car* y furgonetas –por presentar las mayores oportunidades– y se realizó una encuesta y un modelo de decisión que detectó como atributo más relevante para su adopción el diferencial de precio vs. un vehículo convencional equivalente. Posteriormente, para el vehículo definido, se definió un proceso de fabricación local, cubriendo los principales requerimientos técnicos; relevando proveedores, maquinaria, infraestructura y costearo el total de la duración del proyecto. Si bien para los precios y cantidades definidas, con la tecnología utilizada, el proyecto no resulta factible, se discuten alternativas y condiciones macroeconómicas que lo vuelven rentable, destacándose la liberación diferenciada de aranceles de aduana para insumos necesariamente importados, la aplicación de instrumentos de promoción de la demanda, y el crecimiento del producto bruto argentino.

1. Introducción

En el presente trabajo se propuso estudiar la factibilidad de inserción en el mercado nacional de un vehículo eléctrico pequeño producido localmente, buscando entender la relevancia, para este, de distintos factores. Partiendo de la idea de que, más allá, de las diferencias entre vehículos eléctricos y de

combustión, la adopción masiva de movilidad eléctrica conlleva un importante impacto positivo en el ambiente y en particular en el de las ciudades, al disminuir a cero dos de las principales contaminaciones urbanas, la emisión de gases de combustión y la polución sonora.

Este reemplazo de tecnología se ha dado progresivamente en distintos lugares del mundo y de manera acelerada en los últimos años. Como suele suceder en procesos de innovación tecnológica, y respondiendo a motivaciones de competitividad y geopolítica, los Estados juegan un rol clave en la impulsión de la movilidad eléctrica mediante subsidios a la cadena de valor (terminales, autopartistas, tecnología asociada), a los consumidores (beneficios impositivos, financiación diferenciada) y la aplicación de cambios en regulaciones (mercado eléctrico/mercado automotriz/espacio público). La disponibilidad de infraestructura de carga rápida potencia el desarrollo, si bien el tipo de implementación y grado de impacto varían de mercado a mercado. Otro factor de gran relevancia para entender este fenómeno es el costo total de propiedad del vehículo, contemplando no solo el precio de este, sino también el costo del combustible, mantenimiento, impuestos y otros asociados durante toda su vida útil. El precio de un vehículo eléctrico suele ser mayor que el de su equivalente convencional, pero la energía eléctrica es generalmente más barata que el combustible, los costos de mantenimiento son menores y suelen aplicarse beneficios impositivos/financieros que juegan en favor del vehículo eléctrico. Esto hace que en la actualidad ambas alternativas de transporte estén acercándose a un costo total similar. El impacto es aún más pronunciado en el caso de los vehículos pequeños tipo *city car*, debido a las menores exigencias a nivel del tamaño de las baterías.

2. Metodología

El trabajo realizado presenta la estructura convencional de la cátedra de Trabajo Profesional de Ingeniería Industrial, que propone analizar la factibilidad de realización de un proyecto de negocio desde el punto de vista de mercado, técnico y financiero. En este caso, el proyecto es la *hipotética producción y comercialización en la Argentina (y mercados vecinos) de un vehículo eléctrico pequeño*. Se aplicaron conceptos y técnicas incorporadas a lo largo de la carrera, principalmente sobre modelos estadísticos, estudio de mercados, análisis de costos, organización de la producción y evaluación financiera. El trabajo fue de los primeros en realizarse en el marco del Proyecto Vectores, lo que implicó un mayor componente tanto de investigación propia en la construcción de los interrogantes y respuestas como de vinculación con actores ajenos a la facultad.

Nuestro primer paso fue un relevamiento de bibliografía con el fin de presentar el estado del arte tanto a nivel global (donde la industria muestra una aceleración importante en el último lustro); como a nivel local (cuyo desarrollo es acotado). Al inicio de nuestra investigación, no había vehículos eléctricos a la venta en la Argentina (los primeros lanzamientos se fueron dando en paralelo a esta investigación) con lo que nuestra principal pregunta desde el punto de vista de la comercialización, es decir, cuánto vender y a qué precio, se transformó en la de cuantificar un potencial mercado futuro, inexistente en la actualidad. Para dar respuesta a esto, generamos una proyección sobre la base del análisis del mercado de vehículos convencionales, y a un análisis histórico comparativo de la adopción eléctrica, suponiendo distintos escenarios de desarrollo posible para el mercado nacional. Inspirados en metodologías utilizadas para la evaluación de innovaciones en consumo masivo y en trabajo similares realizados en otros mercados del mundo en el pasado (en el momento en que su situación era similar a la de la Argentina actual) realizamos una encuesta anónima a potenciales consumidores y un modelo de decisión para identificar aquellos atributos del vehículo que hacen más atractiva su adopción. Para responder a las preguntas de cómo y a qué costo producir, contrastamos conocimientos teóricos de organización de la producción con visitas a establecimientos productivos de la cadena de abastecimiento automotriz y relevamiento de sus metodologías y costos. Durante el trabajo fueron fundamentales las entrevistas con referentes de las temáticas involucradas para validar ideas, caminos de investigación y técnicas a aplicar.

3. Resultados y principales hallazgos

Encontramos una serie de puntos comunes en los mercados de mayor desarrollo de movilidad eléctrica. En mayor o menor medida, los principales fabricantes de vehículos convencionales están involucrados en la oferta de vehículos eléctricos. Estas automotrices tradicionales se vinculan con agentes externos, desde grandes empresas del sector energético hasta pequeñas empresas emergentes, dado que se presentan nuevos desafíos tecnológicos, operativos y estratégicos en cuya resolución juega un papel clave la innovación. Esta, muchas veces, proviene de los sectores externos a la industria automotriz, lo cual configura nuevos modelos de negocios por fuera de ella. La intervención estatal es también un punto en común entre los mercados estudiados, si bien no encontramos patrones de uniformidad para su aplicación en tiempo y cualidad. Por otro lado, la relevancia de los vehículos más pequeños es mayor en este nuevo mercado eléctrico que en mercados convencionales. Dadas las menores exigencias a las que están sometidos estos vehículos, en general de uso urbano y trayectos

cortos, se minimizan las desventajas de autonomía y tiempo de carga de baterías. En contraste a lo anterior, la *infraestructura* de soporte, los *precios* relativos entre vehículos y energía, la *aplicación de incentivos estatales* y el *contexto base de transporte* son las áreas con mayor variabilidad entre mercados.

Con el objetivo de detectar factores de éxito y dinámicas que se puedan trasladar al caso argentino, profundizamos el estudio en los mercados de España, India, Colombia, Brasil, Chile y Uruguay. Apoyándonos en las fuentes disponibles revelamos las variables de mercado (cantidades vendidas, precios y modelos), las realidades de transporte e infraestructura y el marco aplicado de regulaciones e incentivos. Este relevamiento servirá como marco comparativo para el entendimiento de la situación argentina y sus potenciales escenarios de desarrollo futuro.

Tabla 1. Tabla comparativa resultado del relevamiento sobre condiciones de partida (países seleccionados)

País	Índice de motorización	Año de lanzamiento	# Modelos disponibles	Índice de Regulación	Índice de Incentivos	# Cargadores lentos	# Cargadores rápidos	Participación de V.E. sobre ventas en 2018
Estados Unidos	821	2011	3	+++	+++	1.48	0.19	1.6%
Francia	598	2011	6	+++	++++	2.07	0.02	1.4%
España	595	2019	15	+++	+++	1.46	0.02	0.3%
Reino Unido	587	2011	4	+++	++++	3.93	-	0.7%
Chile	248	2015	6	+	+	0.56	0.34	0.0%
Brasil	206	2015	6			-	0.06	0.2%
Colombia	111	2013	4	++	++	-	-	0.3%
India	22	2008	2			-	-	0.1%
Argentina	316	2019	4	-	-	-	-	-

Tabla 2. Análisis PESTEL del entorno

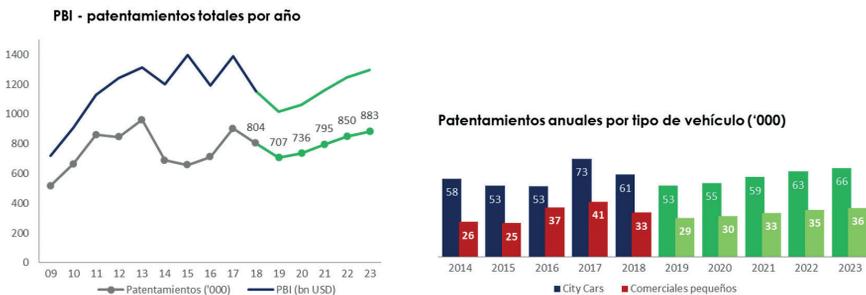
Político	Tecnológico
Incertidumbre en cuanto a políticas de Estado (año electoral). Proyectos de Movilidad Pública Eléctrica en discusión. Liberación de cupos de importación.	Precio a la baja de baterías de litio. Autonomía de los EV cada vez mayor. Constantes mejoras en potencia y eficiencia de los EV. Notorio retraso en desarrollo de infraestructura en relación con otros países latinoamericanos (Brasil – Uruguay – Chile).
Económico	Ambiental
Incertidumbre respecto a la actividad económica, pero con expectativa de recuperación luego de la caída de 2019. Poder adquisitivo afectado por contexto inflacionario y de devaluación de la moneda. Tendencia creciente del precio del barril de crudo.	Tendencia global de reducción de impactos ambientales (Acuerdo de París – Protocolo de Kioto). Nuevas regulaciones que limitan emisiones contaminantes. Concientización de consumidores sobre componentes de los bienes que utilizan.
Social	Legal/Regulatorio
Se replica en la Argentina la tendencia mundial hacia energías no contaminantes. Tendencias hacia la movilidad compartida. Modificación de la percepción sobre los EV. Mayor conocimiento sobre estos. Descontento masificado por el tránsito/contaminación en las urbes.	Creación de nuevas categorías de vehículos L6/ L7 en Reglamento Armonizado Clasificación de Vehículos. Primer otorgación de LCM a estas categorías. Proyectos en discusión. Ausencia de marco regulatorio de precios para venta de electricidad.

Tabla 3. Análisis FODA para la industria de vehículos eléctricos

Fortalezas	Oportunidades
<ul style="list-style-type: none"> - Simpleza de los EV (componentes, desgaste) - Menor costo total de propiedad - Aumento de conocimiento y de percepción positiva - Posibilidad de carga domiciliaria - Oferta nacional: Sero y Volt pueden impulsar el mercado - Producto tecnológico e innovador - Beneficios ambientales - Ventajas tecnológicas se potencian en EV pequeños 	<ul style="list-style-type: none"> - Tendencia mundial hacia energías no contaminantes - Producto exitoso en mercados comparables - Tecnología con alta tasa de aceptación - Limitación a circulación de vehículos - Precio de baterías de litio en declive - Modificación de la legislación argentina en marcha - Otorgación de LCM a Sero Electric - Posibilidad de exportación a mercados - Expectativa de recupero de actividad económica
Debilidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> - Infraestructura de carga deficiente - Penetración del producto / tecnología aún es baja - Dificultad de acceso a componentes clave - Posible rechazo a marca nueva - Costo de baterías aún elevado 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertidumbre en cuanto a la futura actividad económica del país - Poder adquisitivo afectado - Incertidumbre en cuanto a políticas de Estado (año electoral) - Competidores con producción ya vigente - Globalmente, jugadores pequeños duran poco en el mercado y no logran capturar un gran porcentaje.

Para abordar el caso argentino, partimos de relevar el mercado de vehículos convencionales, considerando en paralelo los desarrollos locales en materia de movilidad eléctrica. Pese a signos positivos desde los campos ambientales y del legal/regulatorio, la crisis económica y la incertidumbre política podrían tener efectos negativos sobre un proyecto del estilo. La industria automotriz tiene una gran relevancia en el producto interno del país y supo ser en el pasado un eje clave en reactivaciones económicas (años 91-97 y 03-08) si bien en la actualidad y dado el inconveniente de no contar con capacidades nacionales de producción de baterías es difícil imaginar un escenario donde la industria nacional de vehículos eléctricos fuera priorizada por sobre la industria automotriz convencional. Desde el punto de vista del proyecto es posible concluir que los *vehículos pequeños* presentan *ventajas tecnológicas*, en especial por su mejor performance técnica. El diferencial positivo frente a otros vehículos de su costo global de propiedad, puede resultar aún más relevante en *contextos de utilización por parte de organizaciones*, más racionales al pensar sus flotas. Por otro lado, también son relevantes las *vulnerabilidades en la estructura de costos* para su fabricación nacional y puede ser compleja su implementación en el actual *contexto macroeconómico*. Orientaremos, entonces, nuestra investigación buscando desarrollar un vehículo que pueda comercializarse tanto en versión *city car* como en versión utilitario pequeño.

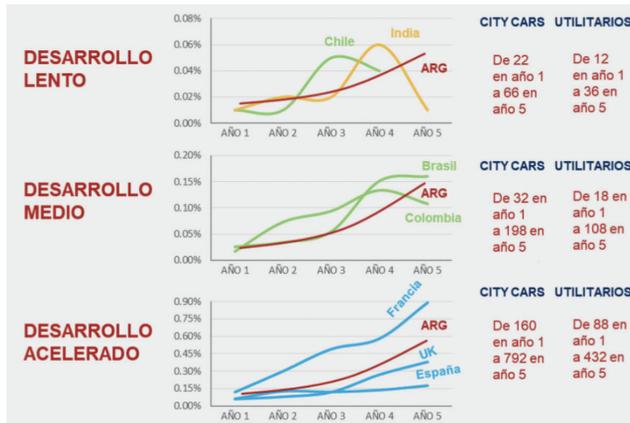
Figura 1. Patentamientos anuales, históricos (2014-2018) y proyectados (2019-2023) para la Argentina



Al analizar las variables del mercado de vehículos convencionales de los últimos diez años detectamos que las ventas de *city cars* y utilitarios representan año a año alrededor del 10% del total de vehículos de pasajeros y el 20% del total de comerciales livianos, respectivamente y notamos una importante correlación entre los patentamientos y el PBI. Basándonos en las proyecciones disponibles para la actividad económica de la región, y en esta correlación con las ventas del mercado, estimamos la demanda de *city cars* y pequeños utilitarios

para los próximos cinco años en la Argentina. Luego, por considerarlos como potenciales destinos de exportación, replicamos el análisis para Brasil y Chile.

Figura 2. Planteo de escenarios (% de vehículos eléctricos vendidos sobre totales) para la Argentina



Para estimar la cantidad proyectada a ser captada por alternativas eléctricas, realizamos una modelización mediante escenarios. Nos basamos en el desarrollo histórico que tuvo el sector en los países previamente mencionado y planteamos escenarios potenciales: lento, medio y acelerado, en función de los distintos rumbos que puede tomar el país en los próximos años. Así logramos estimar el tamaño del mercado de EV en la Argentina en cada uno de los escenarios, aplicando la tasa de adopción (porcentaje de *city cars* eléctricos sobre *city cars* totales) a las cantidades proyectadas inicialmente. Durante el desarrollo de nuestra investigación sucedieron hitos relevantes para el mercado como los avances del vehículo cordobés Volt, y el lanzamiento al mercado de algunos modelos como la Kangoo ZE de Renault y el Sero Electric, de fabricación nacional. También hubo avances en cuanto a la normativa. Incluso, en algunos distritos, se lanzaron medidas de promoción como beneficios en patentamientos eléctricos y reducción de impuestos para terminales que importen unidades de este tipo. Sin embargo, el desarrollo de la economía a partir de la segunda mitad de 2019 deja a nuestro país, según nuestro criterio, en el escenario de *desarrollo lento* hacia *desarrollo medio*.

Modelo de elección discreta

Para tener mayor granularidad en el entendimiento de la adopción, decidimos realizar un modelo de elección, a partir de datos relevados mediante una

encuesta. Esta fue orientada a potenciales consumidores de automóviles, evaluando si elegirían (o no) un vehículo eléctrico. Dicha encuesta consistió de 25 preguntas, junto con un ejercicio de decisión. Fue realizada de forma *online* y alcanzó alrededor de 8500 casos de decisión utilizables y 984 personas encuestadas entre las que predominaron menores de 35 años con domicilio en el AMBA. Determinamos utilizar un *modelo de elección discreta* y basar el estudio en la decisión por parte de los encuestados entre un *city car* convencional y uno eléctrico.

El resultado global fue que 54% de los encuestados eligen el eléctrico por sobre el convencional. Para la alternativa más favorable (menor diferencia de precio, mayor autonomía y menor costo por consumo) este número es del 94% y del 20% para la menos favorable. Aplicando un modelo de regresión logística sobre estos datos pudimos determinar, como principal resultado, que el precio es el atributo que más influye la decisión de compra.

En función de estos resultados, y del análisis exploratorio aplicado al resto de las respuestas, podemos esperar que nuestro producto sea adoptado con mayor éxito en el mercado en tanto pueda otorgar el mismo nivel de satisfacción al usuario, especialmente en cuanto a confianza y consumo; y su precio no se aleje demasiado del de un vehículo convencional equivalente. Con esto en mente, nuestro proyecto de producto queda definido como un *vehículo city car eléctrico pequeño, destinado principalmente a uso urbano a bajas velocidades, configurable en dos versiones: como automóvil de uso particular y como utilitario de uso en logística de última milla*. Estos vehículos corresponden a la categoría L7(b) –cuatriciclos provistos con cabina, con tracción de dos o cuatro ruedas– para el transporte de personas o mercancías. La normativa plantea dos limitantes sobre esta categoría de vehículos: la masa en vacío máxima (sin baterías) que debe ser menor a 550 kg para el utilitario y de 400 kg para el *city car*, y la potencia máxima continua nominal que no debe superar los 15kW para ambas versiones.

Nuestro *city car* podrá comportarse de forma similar a cualquiera del segmento en condiciones normales de uso urbano y ofrecer mismos niveles de confort y seguridad en la conducción. Es por eso que ubicamos el precio de nuestro *city car* cerca del promedio de la categoría, pero levemente por encima, en 14.500 USD, nivel límite superior que el mercado puede aceptar según nuestro relevamiento. Para la versión de utilitario pequeño, proponemos un vehículo con capacidad de 2 m³ de carga y 80 km de autonomía. Esto es una prestación inferior en capacidad respecto de lo ofrecido por los modelos convencionales (todos en el orden los 3 m³) por lo que ubicamos nuestro vehículo en el punto de 15.500 USD (similar nivel de precio que la versión ICE, pero con prestaciones menores). Por las condiciones competitivas que enfrentamos, supondremos que

nuestro proyecto abarcaría un 33% de las ventas para el primer y segundo año. Para los años siguientes, asumimos un 20% del mercado, dada la expectativa de aparición de nuevos competidores. En el caso de Brasil y Chile, mercados más competitivos y que nos exigen superar una barrera de entrada a través del desarrollo de distribuidores y otros costos asociados a la exportación, supondremos un 5% de cuota desde el momento inicial, y se mantendrá fijo.

Estudio técnico

Tras un relevamiento de bibliografía general sobre mecánica del vehículo y métodos de producción automotriz comenzamos a plantear nuestros modelos teóricos y contrastarlos con la opinión de especialistas, fabricantes, proveedores y bibliografía especializada. En este punto fue de gran importancia la vinculación con uno de los fabricantes locales de *city car*, INTI (por cuestiones relacionadas con la normativa - LCM) y la participación en la AAVEA. Con esto fue posible definir las principales características técnicas de los componentes del vehículo y su proceso productivo, es decir, los procesos a realizar, las capacidades de maquinaria y mano de obra necesarias para este, validando no solo su viabilidad teórica sino también desde el punto de vista económico y logístico. Si bien con distintos grados de granularidad y no siempre de forma directa, fue posible realizar un relevamiento estimativo de costos operativos y de la inversión necesaria para el proyecto.

Tabla 4. Definición de producto

Sistema de potencia	Motor AC asincrónico, 12Kw + LiFePO4 10kwh
Tren delantero	Sistema de frenos, de suspensión y de dirección
Sistema de transmisión	Relación 5:1
Chasis + Estructura	Tubular autoportante de Al y Acero
Carrocería	Carrocería de Polímeros
Exteriores	Rodado 155/70/R14, Cristalería
Interiores	Confort, A/C
Luminaria y espejos	Faros, Luminaria Interna, Espejos externos e internos
Sistema eléctrico secundario	Tablero digital, estéreo multimedia, motor levanta vidrios y motor limpiaparabrisas

Optamos por un motor AC asincrónico de 12 kW (2.500-3.000 RPM), dado que son los más económicos de los analizados, requieren de poco mantenimiento, son robustos, cuentan con una buena potencia y un par constante y existe un mercado de abastecimiento local para este. Realizamos su dimen-

sionamiento teórico, contemplando la fuerza de inercia, el rozamiento con el pavimento, la fuerza aerodinámica, el rendimiento promedio contemplando ineficiencias, el rodado a utilizar (155/70/R14), la velocidad máxima (70 km/hr para el *city car*, y de 65 km/hr para el utilitario) y distintas condiciones de uso con sus exigencias máximas (pendientes de 25° con carga máxima admitida del vehículo). Seleccionamos baterías de tipo Litio Hierro Fosfato por ser las de mejor relación entre costo, rendimiento, disponibilidad y energía específica/vida útil. Para su dimensionamiento, se consideró el consumo promedio de vehículos similares, la eficiencia promedio de las baterías, su densidad energética y energía específica. Concentrándose en peso, costo y autonomía, se seleccionó la opción de un proveedor local de 10 Kwh con peso de 85 kg. Esta batería le da al vehículo una autonomía del orden de los 80 km. El resto de los componentes del sistema de potencia quedan subordinados a este conjunto de motor y batería.

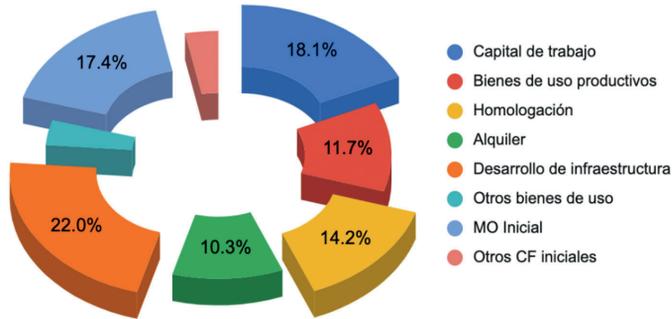
El criterio utilizado para seleccionar el resto de sistemas fue contemplar cuál es la mejor alternativa para nuestros requerimientos considerando nuestros limitantes (características del vehículo, uso comprobado en la industria automotriz, disponibilidad nacional y una visión integral del costo). Las dos versiones, *city car* y utilitario, comparten el mismo sistema de potencia. Las diferencias entre estos se dan en el chasis, estructura y carrocería (que le brindan al utilitario una mayor capacidad de carga) y en interiores, para lo cual el *city car* cuenta con un mayor grado de confort.

Estudio económico-financiero

Contemplando las inversiones necesarias y los costos asociados al desarrollo tanto de la estructura productiva, como de la estructura necesaria para el funcionamiento de las áreas de soporte analizamos la viabilidad económica/financiera del proyecto para el total de su vida útil. Los ingresos del proyecto corresponden con el abastecimiento de las unidades demandadas por año, según nuestro análisis de mercado, mientras que el valor de la inversión necesaria y los costos de operación asociados fueron relevados y/o estimados para el proceso de fabricación definido en el capítulo de análisis técnico. Para el descuento de flujos utilizamos un valor de TREMA=18.72% obtenido a partir de aplicar el modelo CAPM.

Inversiones y costos asociados a la puesta en marcha del proyecto corresponden a dos grupos de aplicación: el desarrollo de la estructura productiva del proyecto, y el desarrollo de la estructura de soporte, administración y ventas.

Figura 3. Composición de las inversiones y sus costos asociados



Tiene especial relevancia el proceso de homologación durante la implementación del proyecto, sin el cual las unidades a producirse a partir del año 1, no estarán habilitadas a circular en vía pública. Al finalizar el proyecto, recuperamos la inversión en capital de trabajo y suponemos el recupero de la inversión de los BU remanentes al 50% de su valor de compra inicial y el recupero de la inversión en infraestructura al 90% de su valor inicial.

A partir del año 1, tendremos los costos asociados al total de la operación, compuestos por materia prima, mano de obra directa, gastos generales de fabricación y otros costos fijos.

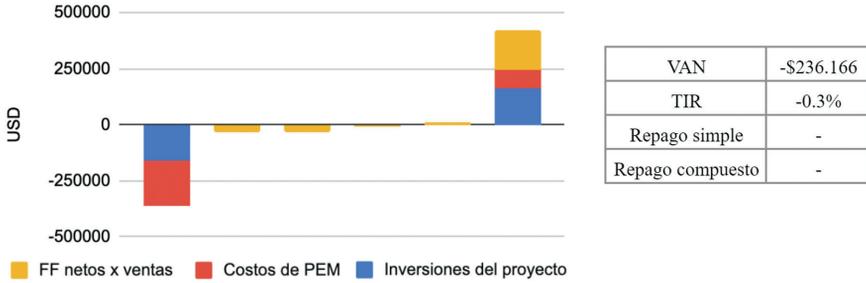
Tabla 5. Composición del costo unitario del vehículo (En año 1)

Materia Prima	74%
Sistema de Potencia	52%
Carrocería + Exteriores	12%
Resto de sistemas	10%
Mano de obra directa	14%
Gastos generales de fabricación	2%
Otros Costos Fijos	10%

El resultado de negocio, si bien es mínimo, resulta positivo año a año para nuestro proyecto en el nivel de ventas proyectado. El principal aporte positivo proviene de las ventas de utilitarios que tienen un mayor margen unitario, si bien estas representan solo entre el 15% y el 20% de las ventas totales año a año. De esta forma, podemos armar el flujo de fondos para la totalidad del proyecto. Analizando el perfil financiero que resulta, y entendiendo las hipótesis

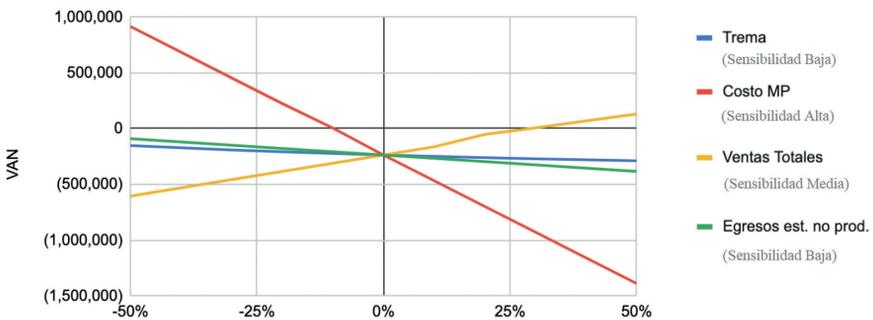
y estimaciones detrás de cada concepto, podremos sacar algunas conclusiones sobre sus características más relevantes.

Figura 4. Flujo de fondos del proyecto



Para evaluar el valor actual neto del flujo de fondos calculamos la TREMA a partir del método CAPM, utilizando una tasa de riesgo país de 6 puntos, resultante del promedio histórico de los últimos cinco años en la Argentina a noviembre 19. El flujo de fondos del proyecto, tal como está planteado, no genera valor y arroja una tasa interna de retorno negativa. Los principales puntos negativos son la *magnitud de la inversión inicial* y el *bajo margen* entre el costo y el precio de venta de los vehículos.

Figura 5. Análisis de sensibilidades del flujo de fondos (VAN)



Dado que la Tasa Interna de Retorno es negativa, no hay un valor de la TREMA que vuelva al proyecto rentable. Por su relación con el margen bruto del negocio, el costo de materia prima tiene el mayor impacto en la viabilidad del proyecto. Con una reducción del 10% se alcanza el punto de equilibrio del proyecto. Respecto al volumen de ventas, el punto de equilibrio se alcanza

recién con un aumento del 33% venta año a año. Para el nivel de ventas asociado a nuestro escenario de mercado de *desarrollo acelerado* (100% de aumento respecto al nivel de *desarrollo medio*, considerado factible en este estudio), el proyecto tiene un VAN de 372.000 USD y una TIR de 40.5%. Es factible abastecer este nivel de demanda sin inversiones adicionales, agregando un nuevo turno de trabajo de 9 horas. Si bien el 40% de los egresos iniciales corresponden a la puesta en marcha de las áreas no productivas, el proyecto no tiene una alta sensibilidad a estos egresos. El punto de equilibrio se alcanza para una reducción del 80% de estos, a partir de la cual el proyecto es factible.

4. Discusión y conclusiones

Dada la naturaleza de nuestro estudio técnico, no nos es factible avanzar hacia un análisis más profundo de costos de fabricación. Por otro lado, vimos una alta sensibilidad al precio de venta, y no vemos oportunidades de penetración al posicionarnos a precios mayores. Podemos, en cambio, analizar alternativas sobre el planteo conceptual del proyecto, en función de mejorar el resultado. Las baterías representan el 45% del costo de M.P. Si bien analizamos proveedores nacionales, gran parte de los insumos para su conformación son necesariamente importados. De aplicarse una reducción en las tasas de importación, el impacto en el proyecto sería inmediato. Por otro lado, una política de incentivo que se observa en otros mercados, como el plan MOVEA en España, es el subsidio directo al precio de venta. Una aplicación de tal subsidio con valores similares a los aplicados en el mercado europeo (15%), elevaría nuestra percepción final a 16.675 USD para el *city car* y 17.825 USD para el utilitario, manteniendo el precio final inicial para los consumidores. De esta forma, el proyecto se vuelve viable, alcanzando una TIR de 34.8% y un repago simple de 3.3 años. Por último, dado que el utilitario tiene un mayor margen bruto, dedicándose solo a este segmento, con un rediseño del proyecto a una escala más chica con menor inversión y menores costos fijos, el proyecto reduce su escala y resulta viable.

En conclusión, observamos que las principales oportunidades de desarrollo en la Argentina están ligadas tanto a la salida de la recesión y a la resolución de puntos que aún quedan pendientes en el marco normativo, como lo relativo a la venta de energía eléctrica para recarga en estaciones, el tratamiento de las baterías en todo su ciclo de vida, y por último, a la evolución que tengan los precios relativos de vehículos, combustible, y energía eléctrica. Con esto dado, creemos que los *city cars* y los utilitarios pequeños, para ser utilizados en logística urbana de última milla, tendrán las mejores oportunidades de crecimiento en el mercado de vehículos eléctricos.

Detectamos los limitantes que impone la baja escala de producción sobre esta modalidad de fabricación símil artesanal que no permite alcanzar eficiencias operativas para la fabricación de la mayoría de los componentes y mismo para las tareas de ensamblado. El problema se repite en instancias como el desarrollo de proveedores. Al mismo tiempo se observa cada vez más la presencia de vehículos conformados sobre la base de Kit Cars importados desde China con un costo muy bajo en comparación con el costo unitario total relevado para este proyecto. Puede haber oportunidades en un planteo inteligente de incorporación de estos componentes importados en un proyecto de fabricación local pero a la vez una incorporación sin criterio de la totalidad de estos componentes, no solo no sería del todo bien recibida por el mercado que demanda vehículos de mayores prestaciones sino que desaprovecharía el alto nivel de desarrollo local que presenta hoy la cadena de abastecimiento de la industria automotriz.-

El mercado aún no presenta un tamaño relevante como para absorber la producción que generaría un proyecto de mayor escala que solucione los inconvenientes antes mencionados, pero de todas maneras es cuestión de tiempo para que estos proyectos comiencen a desarrollarse en la región, así, la ventana para tomar medidas que puedan posicionar al país como un enclave relevante en la participación de este mercado, pareciera cerrarse en el corto plazo. Observando las tendencias globales y su aceleramiento en el corto plazo vemos que la llegada de este nuevo paradigma en movilidad es un hecho que se terminará dando, con mayor o menor participación de las capacidades nacionales en la cadena de suministro.

5. Bibliografía

- Bermudez- Forn, E, Mañez, G. y otros (2018). “Guía práctica para el desarrollo de una estrategia nacional de movilidad eléctrica”. ONU Medio Ambiente.
- Convenio Colectivo de Trabajo 260/75 y Convenio Salarial (2020). Rama N°4: Automotor. Recuperado de: <https://www.uom.org.ar/site/convenios-y-salarios/>
- Cuesta Capellán, G. (2017). *Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de categoría L7 tipo Smart*. España, ETSEIB.
- Dasso, M. (2016). *Un nuevo rumbo: el rescate de la industria automotriz argentina*. Argentina.
- Diseño Del Marco Regulatorio para el Desarrollo de los Vehículos Eléctricos En Colombia. Colombia: USAENE, Tecnalia, 2019.
- Dulcich, F., Otero, D., y Canzian, A. (2018). “Evolución histórica, situación actual y perspectivas de la cadena automotriz a nivel global y regional: ¿Son

- los vehículos eléctricos una oportunidad para la Argentina?”. Argentina, Dossier informativo del CIDIV, Universidad Tecnológica Nacional.
- “Estrategia Nacional de Electromovilidad: Un camino para los vehículos eléctricos”. Chile, Gobierno de Chile, 2018.
- EV Volumes. EV Data Center (2019). Recuperado de: www.ev-volumes.com/datacenter
- Glerum, A., Stankovikj, L., Thémans, M., y Bierlaire, M. (2014). “Forecasting the demand for electric vehicles: accounting for attitudes and perceptions”. *Transportation Science*, 48(4), 483-499.
- Global EV Outlook: Scaling up the transition towards electric mobility. IEA Publications, 2019.
- Gómez-Gélvez, J., Mojica, C. H., y otros (2016). “La incorporación de los vehículos eléctricos en la Argentina”. EE. UU., BID.
- Hosmer, D. W. y Lemeshow, S. (2000) *Applied Logistic Regression*. EE. UU., John Wiley & Sons, Inc.
- IDB. (2016). “The incorporation of electric cars in Latin America”. Rep. Tec., Banco Interamericano de Desarrollo.
- Índice de confianza del consumidor, Índice de coeficiente de variación salarial, Índice de Salarios, Estimador mensual de Actividad Económica, Producto Bruto Interno (2019). Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/>
- Informe del mercado automotor. Chile, ANAC, 2019.
- LatinFocus Consensus Forecast reports on the Latin American economy. Focus Economics, 2019.
- Malhotra, N.K. (2008). *Investigación de mercados* (5.ta ed.). México, Pearson Educación.
- McKinsey Center for Future Mobility. (2017). “Trends in electric-vehicle design”.
- Müller, A., (2020). “El transporte argentino: actores en debate”. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires.
- “O Desempenho da Distribuição Automotiva no Brasil”. Brasil, Fenabravre, 2018.
- “Parque Automotor Colombia”. (2016). Recuperado de: <http://www.andemos.org/index.php/cifras-y-estadisticas-version-2/>
- Ravindra S. y Thosar, A. (2017). “Comparison of electric motors for electric vehicle application”. India: Government College of Engineering.
- Santa-Eulalia, L.A, Neumann, D. y Klasen, K. (2011) “A simulation-based innovation forecasting approach combining the bass diffusion model, the discrete choice model and system dynamics, an application in the german market for electric cars”. SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation

Takeuchi, H. y Nonaka, I. (1986). “The new product development game”. *Harvard business review*, 64(1), 137-146.

Tryti, H. y Pareel, G., (2019). “India EV Story Emerging Opportunities”. Noruega, Innovation Norway.

Ventas a concesionarias de vehículos nacionales e importados en unidades y Patentamientos de autos de origen argentino, brasileño y del resto del mundo (2019). Recuperado de: <https://datos.gob.ar/>

ENERGÍA E INFRAESTRUCTURA



ESTUDIO DE CONSUMO DE ENERGÍA DE BUSES ELÉCTRICOS PARA TRANSPORTE PÚBLICO CON RECORRIDO DEFINIDO, CRITERIOS DE OPTIMIZACIÓN DE AUTONOMÍA Y SISTEMAS DE CARGA

Gonzalo Ezequiel Fichera

Resumen

El siguiente estudio busca encontrar cuál es la infraestructura óptima para electrificar toda la flota de la Línea 59, utilizando buses 100% eléctricos. Se analizarán dos estrategias: 1) buses que tienen una gran autonomía y cargadores de baja potencia (carga lenta) y 2) buses que tienen una menor autonomía y cargadores de alta potencia (carga rápida). Cabe destacar que los buses que tienen una alta autonomía, se debe a que tienen mayor capacidad de almacenar energía, por lo tanto la inversión inicial en baterías en la opción de “carga lenta” es mayor que en “carga rápida”. Sin embargo, se utilizan cargadores de baja potencia en carga lenta, siendo más económicos que los de alta potencia en carga rápida. Es clara la disyuntiva que se tiene a la hora de elegir la estrategia de carga. El objetivo de este estudio es buscar la respuesta a esa pregunta, utilizando la línea 59 de modelo con sus características particulares que veremos más adelante.

1. Introducción

Este trabajo surge en el marco del Vector de Movilidad Eléctrica del Proyecto Vectores, que está en articulación con los programas interdisciplinarios: PIUBAT, PIUBAES y PIUBAD de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UBA. En este marco, se definieron tres líneas de trabajo: buses, vehículos pequeños e infraestructura. Este estudio contempla las líneas de buses e infraestructura.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor de siete millones de muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire ambiental durante 2016.

Los contaminantes principales generados por los medios de transporte son:

- Gases de Efecto Invernadero (GEI): incluye al dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxidos de nitrógenos (Nox).
- Material Particulado (PM): las partículas de 10 micrones o menos (PM10) pueden penetrar profundamente en los pulmones y acumularse, y las menores a 2,5 (PM 2,5) pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar al sistema sanguíneo, provocando enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón.
- Ozono (O_3): no se emite directamente pero es consecuencia de otros GEI.
- Contaminación sonora o acústica: producto de los motores convencionales.

En el año 2015, se firmó el “Acuerdo de París”, en el cual se establece la meta global de reducción de emisiones de GEI para mantener la temperatura media global como máximo 2 °C por encima de los niveles preindustriales.

Los buses eléctricos tienen como ventaja primordial no emitir gases de forma local, aunque sí se contempla toda la cadena de suministro, ya que habría emisiones en las plantas generadoras de energía eléctrica, la cual depende de los combustibles fósiles. La ventaja es que es una fuente de emisión puntual y se puede lograr controlar con mayor eficacia.

Hoy por hoy, la Argentina emite 592 MtCO₂ eq/año. Según el informe ambiental de 2018, provisto por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de Nación, la contribución determinada a Nivel Nacional fue de 483 MtCO₂ eq para el año 2030, sin apoyo externo y de 369 MtCO₂ eq con apoyo externo. A su vez, la Ciudad de Buenos Aires, creó el “Plan de Movilidad Limpia de la ciudad 2035”, donde se busca reducir en 18% las emisiones de GEI y reducir un 50% aquellas que inciden en la calidad del aire. Dentro de este marco, se creó la Prueba Piloto de buses eléctricos.

En esta prueba piloto, se iban a implementar ocho buses eléctricos en cuatro líneas diferentes (34; 39; 12 y 59). Finalmente, la prueba piloto se llevó a cabo en la línea 59 y se utilizaron dos buses Yutong E12 que tienen una capacidad de baterías de 324 Kwh, junto con un cargador de potencia nominal de 150 Kw. Esta estrategia la podemos denominar de “carga lenta”.

2. Metodología

Como se mencionó anteriormente, este estudio pretende conocer cuál es la infraestructura óptima para electrificar el total de la flota de la línea 59, que es de 112 unidades, manteniendo la operación actual y al menor costo posible. Las principales características de esta línea es que la distancia entre sus dos cabeceras (Barracas – Munro) es de 29 km. La frecuencia es de dos minutos y la antigüedad de la flota es de 2,6 años.

A la hora de hablar de buses eléctricos, es fundamental conocer el precio de las baterías y cómo será la evolución del precio de las baterías. Como podemos observar en el siguiente gráfico, la tendencia en el mediano plazo es que el precio de las baterías decaiga aproximadamente un 10% de forma anual.

Figura 1. Evolución del precio de las baterías Ion - Litio



Fuente: elaboración propia sobre la base de consulta realizada a la empresa VZH.

Para esto, tanto para carga lenta como para carga rápida debemos saber:

1. Cuáles serán los buses a utilizar (la variable más relevante es la capacidad de las baterías, ya que esto condiciona la autonomía de estos y la inversión necesaria en baterías).
2. Cuántos cargadores se requieren
3. Modificación eléctrica
4. Cómo será la implementación de buses, cargadores y de la infraestructura eléctrica

Respecto al primer punto, los buses que representaran la estrategia de carga lenta serán los implementados en la prueba piloto de la línea 59.

Por el lado de la carga rápida, utilizaremos como modelo los que se iban a implementar en la línea 39, que tienen una capacidad de baterías de 151,55 Kwh y un cargador de 300 Kw.

Para determinar la cantidad de cargadores a utilizar, se optó por dos estrategias diferentes para carga lenta y carga rápida. Para el primer caso, los buses se cargarán durante la noche, a la mañana saldrán con un SOC (State of Charge)

– Estado de Carga) del 100% y luego de realizar durante todo el día 232 km, correspondientes a cuatro vueltas de 58 km (dos en el turno mañana y dos en el turno tarde), terminarán con un SOC cercano al 30%. Se comenzó conociendo la operación de la línea en el momento más crítico, que son los días hábiles en el turno mañana y tarde. Sobre la base de esta información, se puede concluir para las 112 unidades a qué hora estarán finalizando su jornada laboral y, por lo tanto, ese será el horario en que podrán comenzar a cargarse y, por el otro lado, a qué hora comienzan su jornada laboral, ya que este será el horario que se necesita el bus con un estado de carga del 100%.

Luego conociendo el consumo de la prueba piloto, que fue de 0,995 Kwh/km y sabiendo que cada bus realiza 232 km/día:

$$\text{Consumo diario} = 232 \frac{\text{Km}}{\text{día}} * 0,995 \frac{\text{Kwh}}{\text{km}} = 230,84 \text{ Kwh/día}$$

Sabiendo que utilizaremos cargadores de potencia 150 kw, y que cada cargador podrá cargar dos unidades al mismo tiempo con una potencia de 75 Kw:

$$\text{Tiempo de Carga} = 230,84 \frac{\text{Kwh}}{75 \text{ kW}} = 3,05 \text{ hs}$$

Por lo tanto, podemos sacar los cargadores necesarios en cada estación utilizando un Diagrama de Gantt:

Figura 2. Diagrama de Gantt con factor de carga por cargador



Fuente: elaboración propia.

El resultado es que necesitaremos 11 cargadores de 150 Kw en Barracas (Nueva Potencia demandada: 1650 Kw) y 10 cargadores de 150 Kw en Munro (Nueva Potencia demandada: 1500 Kw).

La estrategia utilizada para carga rápida fue determinar cuál es la máxima cantidad de colectivos que pueden ingresar en 15 min, si la frecuencia es de 2 min (se considera 15 min, ya que es el tiempo que descansan los choferes una vez que

llegan a una estación). El resultado es ocho colectivos. Por lo tanto, durante el día estaremos teniendo muchos bloques de 15 min, pero nunca tendremos necesidad de cargar más de ocho colectivos a la misma vez. De esta manera, si tenemos que:

$$\text{Consumo } \frac{1}{2} \text{ Vuelta} = 29 \text{ km} * 0,995 \frac{\text{Kwh}}{\text{km}} = 28,86 \text{ Kwh}$$

$$\text{Tiempo de Carga} = 28,86 \frac{\text{Kwh}}{300} \text{ Kw} = 5,8 \text{ min}$$

por lo tanto, en 15 min cada cargador podrá cargar hasta 2 buses.

El resultado óptimo es que se necesitan tres cargadores de 300 Kw en cada estación tal que:

Figura 3. Cargas por estación

Colectivo	Viaje	SOC I	SOC F	Viaje	SOC F																		
A	1	81	100	2	81	81	3	62	81	4	62	81	5	62	81	6	62	62	7	43	62	8	43
B	1	81	100	2	81	81	3	62	81	4	62	81	5	62	81	6	62	62	7	43	62	8	43
C	1	81	100	2	81	100	3	81	100	4	81	81	5	62	81	6	62	81	7	62	62	8	43
D	1	81	100	2	81	100	3	81	100	4	81	81	5	62	81	6	62	81	7	62	62	8	43
E	1	81	100	2	81	100	3	81	81	4	62	81	5	62	81	6	62	81	7	62	81	8	62
F	1	81	100	2	81	100	3	81	81	4	62	81	5	62	81	6	62	81	7	62	81	8	62
G	1	81	81	2	62	81	3	62	81	4	62	81	5	62	62	6	43	62	7	43	62	8	43
H	1	81	81	2	62	81	3	62	81	4	62	81	5	62	62	6	43	62	7	43	62	8	43

Fuente: elaboración propia.

Luego se verificó que, con esa cantidad de cargadores, todos los buses puedan ser llevados de un SOC de 43% y 62% al 100% durante la noche para salir al día siguiente con un SOC del 100% nuevamente.

Debido a la incorporación de cargadores, ambas estaciones (Munro y Barracas), dejarán de recibir en baja tensión y pasarán a recibir en media tensión. Por lo tanto, se dimensionó un centro de transformación en cada estación. Para carga lenta, tendremos en total los siguientes transformadores: 1 de 100 Kva, 9 de 315 Kva y 6 de 500 Kva. Por otro lado, para carga rápida tendremos: 1 de 100 Kva y 6 de 500 Kva.

Para definir la implementación, se debió determinar un horizonte de planeamiento. Este fue de ocho años, ya que, si se tomaba un horizonte de planeamiento demasiado extenso como por ejemplo de 16 años que es la vida útil de los buses eléctricos, el error que uno incorpora al modelo es muy grande, ya que la tecnología en lo que respecta a buses eléctricos avanza año a año considerablemente. Si uno consideraba un horizonte demasiado corto, como por ejemplo la antigüedad promedio de los buses de la línea 59 que es de tres años aproximadamente, es un horizonte demasiado pequeño, si uno considera que la antigüedad promedio de las líneas análogas a la línea 59 es cercana a los cinco años. Por lo tanto, se optó por ocho años, que coincide con la vida útil de las baterías.

3. Resultados y principales hallazgos

Carga lenta: 112 Unidades Yutong E12 - 21 Cargadores de 150 Kw, - Transformadores: 1 de 100 Kva, 9 de 315 Kva y 6 de 500 Kva.

Carga rápida: 112 Unidades King Long XMQ6127G – 9 cargadores de 300 Kw Transformadores: 1 de 100 Kva y 6 de 500 Kva.

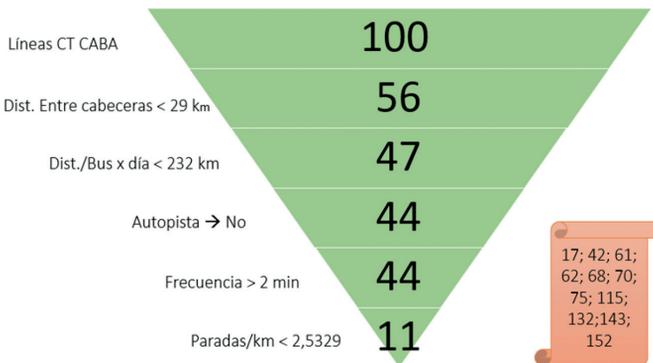
Luego de realizar un estudio económico-financiero, se considera que la opción más económicamente favorable es la de carga rápida, aunque el VAN sigue siendo negativo.

4. Discusión

Si bien la estrategia de carga rápida es más favorable que la estrategia de carga lenta, ya que el VAN es menos negativo, este sigue siendo negativo. Esto nos indica que el Estado debe brindar cierto apoyo para que la implementación de buses eléctricos sea viable desde el punto de vista económico. Una alternativa para que el VAN = 0 en carga rápida es disminuir el impuesto a las importaciones que en la actualidad es de un 35% en un 4,53 %.

Es interesante analizar cuáles son las líneas análogas a la 59. Si consideramos las variables de corte de la línea 59, y consideramos a todas aquellas líneas que pasan por algunos de los centros de trasbordo tendremos:

Figura 4. Cantidad de líneas según criterio



Fuente: elaboración propia sobre la base de datos del gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

En estas 11 líneas podríamos concluir que *a priori* la mejor estrategia de carga es la rápida: 17, 42, 61, 62, 68, 70, 75, 115, 132, 143,152.

5. Conclusión

Podemos observar que para electrificar el 100 % de la flota de la línea 59, la estrategia de carga rápida es mejor que la estrategia de carga lenta. A su vez, para que sea económicamente viable se debe realizar una inversión pública-privada, por ejemplo, se propone que el Estado disminuya el impuesto a las importaciones en un 4,53%.

6. Bibliografía

<https://www.ednh.news/es/las-emisiones-de-co2-en-el-mundo-se-mantuvieron-al-alza-en-2019/>

<https://energia.gob.cl/electromovilidad/recursos-e-informacion-tecnica/cargadores-para-buses-electricos>

<https://www.revistacolectibondi.com.ar/2018/04/04/infografia-asi-son-los-4-modelos-de-colectivos-electricos-que-circularan-por-buenos-aires/>

<http://www.kinglong-bus.es/3-3-3-11-12m-city-bus.html>

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ARGENTINA. SU USO COMO ALMACENAMIENTO E IMPACTO EN LOS ESCENARIOS ENERGÉTICOS Y COSTOS DE LARGO PLAZO

Darío Slarifstein

Resumen

En este trabajo nos hemos centrado en las posibles consecuencias de la inserción de Vehículos Eléctricos a Baterías (VEB) en el sistema energético argentino. Esto se analizó utilizando la Plataforma de los Escenarios Energéticos (Ministerio de Energía y Minería, 2017), cuantificando distintos aspectos de la problemática mediante indicadores característicos, principalmente matriz energética, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y costos asociados.

En primer lugar, se ha modelado en profundidad distintos modelos del posible comportamiento de VE y se ha verificado que estos abren importantes oportunidades a la descarbonización de la economía, en general y a la matriz energética en particular. Según el modelo propuesto la irrupción de VE, actuando como almacenamiento de energía, desplazará el consumo de combustibles fósiles (principalmente Gas Natural) en aproximadamente 11 MTep para 2040. Este desplazamiento abre la posibilidad de devengar inversiones del parque de generación (no instalar centrales térmicas) o lograr una mayor penetración renovable (instalando más centrales Solares Fotovoltaicas).

En segundo lugar, los VE como almacenamiento también ayudan a reducir el Costo Medio de la Energía Eléctrica (C_{me}) en el largo plazo, debido al ahorro en el consumo de combustibles. En caso de que se elija devengar inversiones, esto también reducirá el C_{me} debido a un ahorro de Capital (CAPEX).

En tercer lugar, también se identificaron posibles alianzas inter-sectoriales (gasífera nacional y renovables internacional), las cuales permitirían el desarrollo del sector en la Argentina, acelerando y promoviendo la transición energética.

1. Introducción

En el contexto de la transición energética global la *Electrificación del Transporte* y el *cambio de paradigma de Movilidad* aparecen como puntas de lanza en la

reconversión del parque energético. Las cinco tendencias globales en materia de movilidad (vehículos autónomos, conectados, eléctricos e inteligentes, ACES por sus siglas en inglés) todavía tienen consecuencias inciertas y, probablemente, inesperadas.

Para empezar, en la actualidad el sector del transporte representa *un tercio* del consumo energético total mundial (International Energy Agency, 2018). Este sector de la demanda usa principalmente *combustibles fósiles líquidos* y, por lo tanto, su *electrificación* es necesaria para su descarbonización. Esto debería apalancar un crecimiento sin precedentes en la participación de la demanda de electricidad como energía de consumo final (McKinsey Energy Insights, 2019). Es por ello que el sector eléctrico debe prepararse para ser un actor central en un futuro energético renovable, flexible y des-centralizado en el que la complementareidad de las distintas tecnologías de demanda, generación y acumulación de energía permita un desarrollo fluido de las actividades humanas.

Esta problemática técnico-económica será abordada desde la herramienta de los Escenarios Energéticos. Estos son un ejercicio que nos permite reflexionar sobre preguntas del tipo “¿Qué pasaría si...?”. Para ello se utilizaremos el *Long-range Energy Alternatives Planning System* (LEAP). Con este analizaremos indicadores, Tabla 1, y los costos medios y monómicos del sistema.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta las hipótesis de trabajo, los escenarios confeccionados y la metodología general, la sección 3 presenta los resultados obtenidos de nuestras simulaciones y, finalmente, la sección 4 sintetiza los resultados y conclusiones del trabajo.

Tabla 1. Indicadores según Plat. EE. (Ministerio de Energía y Minería, 2017)

INDICADORES	
Descripción	Sigla
Emisiones de gases de efecto invernadero	GEI
Intensidad de emisiones energía primaria	IEEP
Emisiones generación eléctrica	GEIEE
Intensidad de emisiones sector eléctrico	IESE
Emisiones de NOx y SOx	NSx
Uso de suelo	US
Aspectos ambientales de hidrocarburos	AAH
Diversidad energética eléctrica	DEE
Diversidad energética primaria	DEP
Eficiencia energética	EfEn
Independencia externa	IE
Balanza comercial	BC
Conflictividad	Conf

Figura 1. Metodología simplificada



2. Metodología

Para poder modelar el sistema energético argentino deberemos utilizar ciertas hipótesis para describirlo. Para ello describiremos primero nuestros VEB de manera técnica, luego sus costos. Luego construiremos nuestro Escenario Base, conformado por un Plan de Obras de Generación y una determinada evolución de la demanda, que también incluirá ciertas políticas de acción sobre esta.

Modelado de VEB

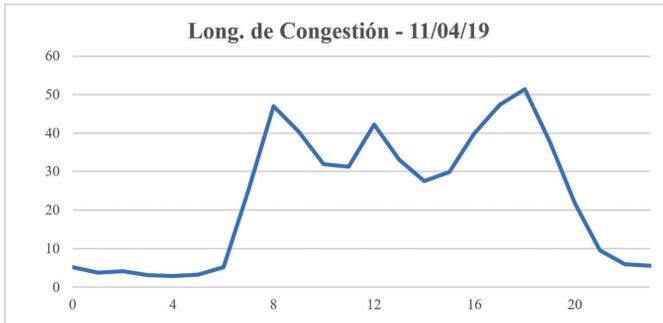
En LEAP, un módulo de transformación, en nuestro caso una central eléctrica, convierte un determinado vector energético en otro. Una refinería convierte crudo en sus derivados una central eléctrica convierte un vector como la radiación solar, el viento o combustibles fósiles en energía eléctrica. Para poder definir una central debemos definirle su producción, curva monótona de producción, y su estructura de costos.

En nuestro caso proponemos tres comportamientos distintos para la utilización de los VEB. El primero es un Escenario Base en el que se supone un consumo constante de electricidad durante cada año en curso de la simulación, el segundo es un comportamiento de carga inteligente, V1X según sus siglas en inglés, y el último es un Esc. en el que usaremos los VEB como almacenamiento de energía. El primer comportamiento es el incorporado por Medina (Medina, 2018) y, finalmente, incorporada a la Plat. de EE (Barbarán, 2018). Los comportamientos del tipo V1X o V2X han sido definidos en numerosas ocasiones como (Sumedha Rajakaruna, Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Charging Strategies, 2015), (Sumedha Rajakaruna, Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Energy Management, 2015), (Sumedha Rajakaruna, Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Integration Techniques, 2015). De manera simplificada podemos decir que en el primer modelo el VEB es simplemente el reemplazo del consumo de combustible fósil en un Vehículo de Combustión Interna (VCI) por un consumo equivalente en km recorridos por de energía eléctrica, el modelo de

carga inteligente agrega un aspecto temporal a ese consumo en el que además proponemos un beneficio para el sistema en su conjunto y, finalmente, en el tercer esquema el VEB no solo se carga de manera conveniente para el sistema, sino que carga un excedente de energía para devolverlo al sistema en otro momento, de nuevo, beneficioso para el sistema.

Para construir los esquemas de V1X y V2X, hemos utilizado datos de congestión provenientes de Waze y AUSA que estiman la utilización de los vehículos en las calles del Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Esta suposición es nuestra primera hipótesis simplificadora. La Figura 2 muestra un día típico de la longitud de congestión, comportamiento el cual asumiremos es representativo de los conductores argentinos. Luego, agregaremos un factor estacional usando los datos provenientes de las autopistas INSERTAR REF. Finalmente, teniendo en cuenta que actualmente un vehículo particular está estacionado aproximadamente un 90% del tiempo (Pasaoglu, y otros, 2013), podemos conformar la disponibilidad y uso de los vehículos, Figura 3, en la que la disponibilidad es el complemento del uso.

Figura 2. Longitud de Congestión, en km. Día representativo 11 de abril de 2019



Siendo así proponemos dos perfiles de uso de los VEB, Figura 4, que cumplen con las restricciones mencionadas por el uso de los VEB y que tienen como objetivo ver el impacto que tienen los VE a la hora de suplantar “máquinas de punta” (i.e. que cubren el pico de demanda) y ver si esto realmente reduce los costos medios del sistema. El resto de las hipótesis iniciales incluyen capacidad de pack de baterías por vehículo, distancia recorrida promedio y parámetros similares, Tabla 2.

Respecto de los costos, los VEB incurren en distintos costos para producir su producto (electricidad). Este producto, además, contiene varios aspectos/facetos que lo componen. La central puede vender energía (en kWh), pero también su capacidad (potencia) de reaccionar ante contingencias (control de tensión, regulación de frecuencia primaria o secundaria, etc.). El LEAP no es apto para mercados de potencia o de servicios auxiliares, por lo tanto, la estructura de

costos a modelar debe incluir ambos servicios de manera conjunta e imperfecta (Tomic, 2007). El costo de generación de energía será entonces el precio de la energía eléctrica comprada para cargar la batería, el cual actuaría como un costo variable de combustible, el costo asociado a la degradación de la batería por la carga y descarga y un recargo extra como manera de aproximar los servicios auxiliares que provee el VE con funciones V2x.

Para estimar el costo de la energía comprada:

$$c_{VE} = c_{en} \cdot P_{carga} \cdot t_{carga} \cdot f_{S.A.} \quad (1)$$

$$c_{en} = \frac{c_{pe}}{\eta_{conv}} + c_d \quad (2)$$

$$c_d = \frac{c_{bat}}{L_{ET}} = \frac{E_b \cdot c_b + c_1 \cdot t_1}{L_C \cdot E_b \cdot DoD} \quad (3)$$

Donde:

c_{en} es el costo de producir la E a inyectar en la red, en US\$/kWh.

c_{pe} es el costo de la E usada para recargar el VE, en US\$/kWh.

η_{conv} es el rendimiento de la conversión del V2x, aprox. 0.75.

c_d es el costo por la degradación de la batería, en US\$/kWh.

E_B es la capacidad de la batería

c_b es el costo de reemplazo de la batería US\$/kWh.

c_1 es el costo de mano de obra para cambiar la batería US\$/kWh

t_1 es el tiempo necesario para cambiar la batería.

L_C es la vida de la batería en ciclos de carga.

DoD es la profundidad de la descarga.

$f_{S.A.}$ es el recargo adicional por proveer Servicios Auxiliares del VE.

Nótese que estamos teniendo en cuenta los costos de capital asociados por comprar un auto eléctrico están incluidos en las hipótesis de gestión de demanda, Sección 3.2. Si bien los automóviles eléctricos considerados en la Plataforma no hacen ninguna distinción respecto de las capacidades V1X o V2X de estos, el costo incremental es mínimo, ya que cualquier auto eléctrico en el mercado tiene frenado regenerativo y sistemas embebidos que están a cargo de las funciones de instrumentación, protección y control.

Es decir, mediante actualizaciones de *software* y *hardware* mínimos se podría tener capacidades V2X. Estos tendrán un costo incremental, suponemos, despreciable en la compra del VE a modelar. Los otros costos de capital

asociados a esquemas V2X corren por cuenta del gasto en infraestructura (líneas, centros de transformación o cargadores), por lo que eso será lo computado como costos de infraestructura según las hipótesis de la Plat. de Esc. (Ministerio de Energía y Minería, 2017).

Figura 3. Curvas de Disponibilidad horaria para la flota de AMBA

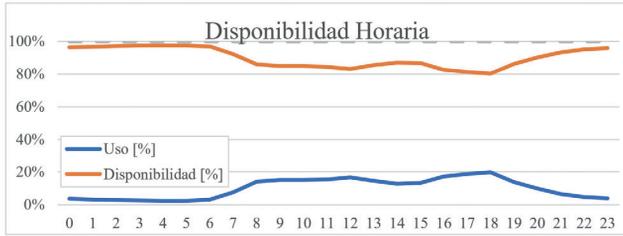
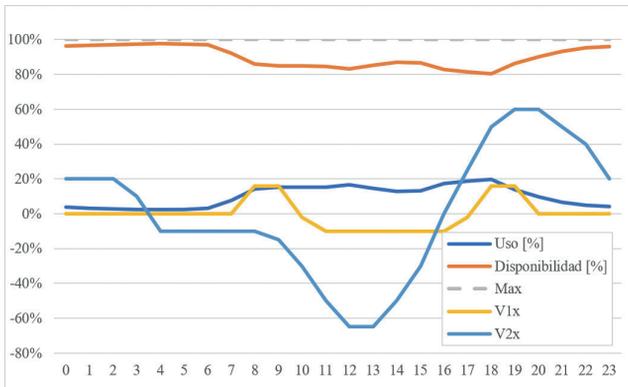


Tabla 2. Datos e hipótesis técnicas

Variable	Descripción	Un	Valor
P_{V2G}	Pot. Del Cargador apto para V2G	kW	15
E_B	Capacidad de la Batería	kWh	80
e_{VE}	Consumo específico del VE	kWh/km	0.2
L_{anual}	km anuales	km/año	17.500
$L_{día}$	km diarios	km/día	48
$E_{VE/día}$	Consumo diario del VE	kWh/día	9,6

Figura 4. Curvas de carga por escenario



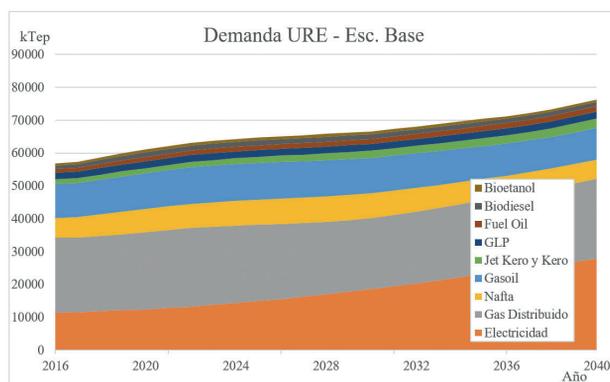
Escenario base

Habiendo descrito el modelo de nuestros VEB, pasaremos a definir el resto de nuestros escenarios definiendo la demanda, ciertos costos particulares y los módulos de transformación/Plan de Obras de cada ejercicio.

Para la definición de la demanda total tomaremos como dato de entrada todo lo indicado en la Plataforma de EE (Ministerio de Energía y Minería, 2017). Esto incluye la Demanda Tendencial y herramientas para estimar una Demanda de Uso Racional de la Energía (URE). Estas últimas tienen un costo asociado por su adopción, i.e. en el caso de la adopción de buses eléctricos se informa el costo incremental de un bus eléctrico respecto de un diésel convencional. Cabe aclarar que la información disponible del escenario también incluye al sector de hidrocarburos. Para este trabajo, hemos elegido implementar todas las herramientas de disponibles para gestionar la demanda, lo cual da como resultado la demanda URE de la Figura 5.

En primer lugar debemos señalar que trabajaremos *solo* sobre los autos eléctricos particulares, *los colectivos eléctricos que son insertados en la demanda no serán objeto de V1x o V2x*. Su eficiencia superior y muchos otros beneficios ya son objeto de numerosos estudios. La gestión de su demanda, además, tiene aspectos que se ajustan mejor a un análisis microeconómico y a un marco temporal más acotado, debido a que dependen fuertemente de su aplicación (ruta, recorrido, frecuencia, etc.).

Figura 5. Demanda escenario base

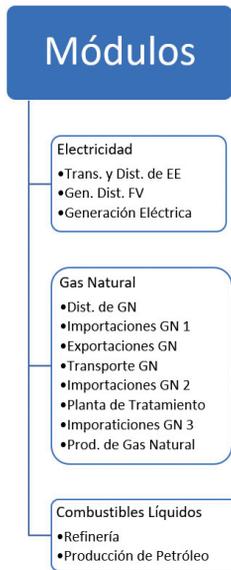


Módulos de transformación

Para proveer a esta demanda de energía secundaria/terciaria a partir de las fuentes primarias (solar, eólica, recursos hídricos y fósiles) contamos con

distintos módulos de transformación. Estos módulos representan un determinado sector industrial (generación eléctrica, producción de hidrocarburos, refinerías, etc.), cada sector entonces estará compuesto por uno o más procesos de transformación, que tomarán fuentes o vectores energéticos (viento, hidrocarburos, etc.) para entregar vectores energéticos o energía secundaria (electricidad, kerosene, naftas, etc.). i.e. un Módulo de Transformación de nuestros escenarios es el de “Refinería”, el cual tiene un único proceso “Refinación de Crudo” el cual toma el recurso primario “Petróleo Crudo” y entrega sus derivados: LPG, Gasolina, Jet Kerosene, diésel, etc.

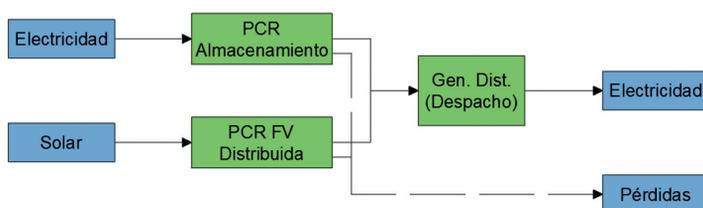
Figura 6. Módulos del escenario base



En el caso del sector hidrocarburífero y gasífero no modificaremos lo realizado en el Esc. Business As Usual (BAU) (Ministerio de Energía y Minería, 2017).

En cambio, para el sector eléctrico debemos aclarar ciertas elecciones de modelado. Para empezar el sector está compuesto por “Transporte y Distribución”, “Generación Distribuida” y “Generación de Electricidad”. Para el “Trans. y Dist.” sus pérdidas son del 3% y su costo de O&M es de 3US\$/MWh. El módulo de “Generación Distribuida” está separado porque incluye almacenamiento domiciliario estático, Figura 7, y se desea hacer un mejor seguimiento de su impacto.

Figura 7. Módulo “Generación Distribuida”



El módulo de “Generación Eléctrica” cuenta con todos las centrales de generación operativas al momento del estudio, “Apéndice I”, los proyectos predefinidos y proyectos candidatos. Para las primeras, podremos elegir si continúan en servicio, para los proyectos predefinidos debemos indicar cuando entraran en servicio y si es que saldrán de operación y para los proyectos candidatos debemos indicar la zona geográfica en donde entrarán, su capacidad en MW, su año de ingreso y si es necesario su salida de servicio. Todas estas decisiones están resumidas en cada uno de los Planes de Obra. Los Proy. Candidatos se encuentran en el “Apéndice I”.

Como premisa básica queremos reducir la utilización de combustibles fósiles líquidos y sólidos, por lo que las centrales Diésel o Carboneras no se usarán en ningún Plan de Obras. Para la expansión del Parque Termoeléctrico se usarán los Proyectos Predefinidos Nucleares, Ciclos Combinados a Gas, Cogeneración y Turbinas de Gas a Ciclo abierto. En la medida de lo posible este será su orden de prioridad para ingresar al Plan.

En cuanto a las Centrales de Energía Renovable se tratará de instalar la mayor cantidad de potencia de los proyectos Eólicos Tipo 3 y 2, Fotovoltaicos A y B y, finalmente, Biomasa de más de 15MW. Además, se instalarán todas las Centrales Hidroeléctricas (Pequeños Aprovechamientos y Grandes Proyectos) para otorgarles alta flexibilidad y bajas emisiones al sistema.

Escenario VIX

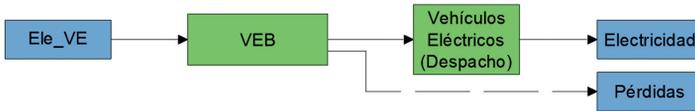
El cambio fundamental entre el presente Escenario (VIX) respecto del de base es que ahora tomamos el 30% de los VEB se comportan de manera inteligente, Figura 4, evitando cargar la batería de los VE una vez que se llega a casa y cargando durante el día aprovechando la gen. Solar Fotovoltaica (SFV). Nótese que la Demanda Total de no varía en términos brutos, millones de kTep, sino que cambia la distribución de sus componentes en el tiempo.

Se adopta el mismo Plan de Obras que el desarrollado para el “Escenario Base”, a fines de la transparencia del modelado.

Escenario V2X

Tomando la misma cantidad de autos que en el “Escenario V1X”, ahora estos también entregan energía a la red, Figura 4, es decir, no solo se cargan las baterías de los autos fuera del pico de demanda, sino que además se toma energía extra en las horas de baja demanda para luego inyectarla una vez que se llega a destino. En este caso, la Demanda Total de energía sí varía en términos brutos y cambia su distribución en el tiempo. Sobre el mismo Plan de Obras del “Escenario Base” se agrega el módulo “VE”, Figura 8. El combustible “Ele_VE” es un combustible “artificial” o “virtual” para no contabilizar dos veces la demanda de la carga de los VEB.

Figura 8. Arquitectura de la Central Virtual de VE

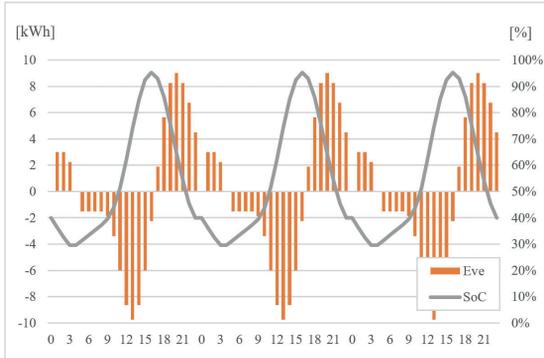


Para el cálculo de costos se debe tener en cuenta la operación, Figura 9, ya que esta implica una evolución del Estado de Carga (SoC). Aplicando el modelo propuesto de costos y referencias (Tomic, 2007) y (Faria, 2014), obtenemos que el costo variable del almacenamiento es de $C_{en,V2x} = 0.24US\$/MWh$, según Tabla 3.

Tabla 3. Hipótesis modelo de costos

Descripción	Un	Valor
C_b	US\$/kWh	175
E_b	kWh	80
c_1	US\$/h	20
t_1	h	6
(Faria, 2014)	ciclos	1200

Figura 9. E_{VE} y SoC de la batería del VE estándar



3. Resultados

Una vez descritos nuestros escenarios los resultados de estos son detallados y analizados a continuación.

Escenario base

Nuestro Escenario Base estará entonces constituido por los indicadores presentados en Figura 10, los cuales han sido diseñados siguiendo los lineamientos establecidos por la Plat. (Barbarán, 2018). También se presentan los costos medios, Figura 11, la Balanza Comercial, Figura 12, y las emisiones generadas Figura 13.

Figura 10. Matriz de resultados y matriz eléctrica a 2040

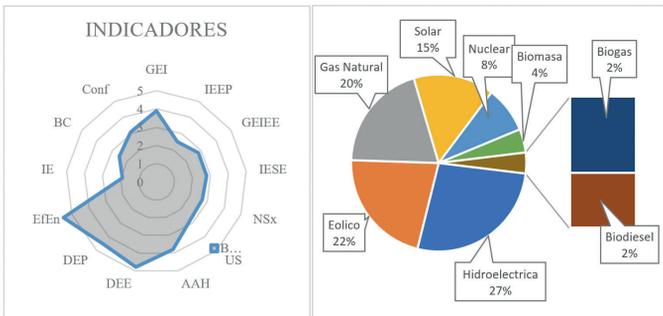


Figura 11. Estructura de costos medios

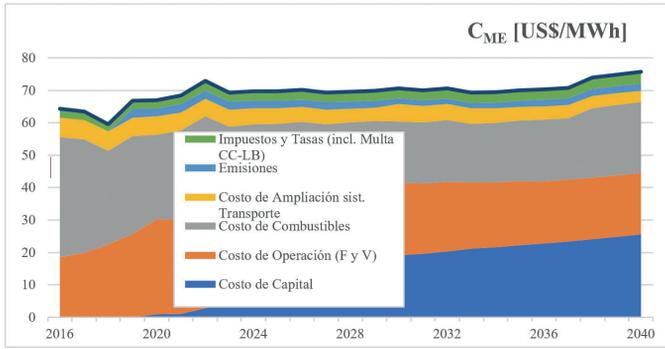


Figura 12. Flujos Expo-Impo, eje der., y Balanza Comercial, eje izq.

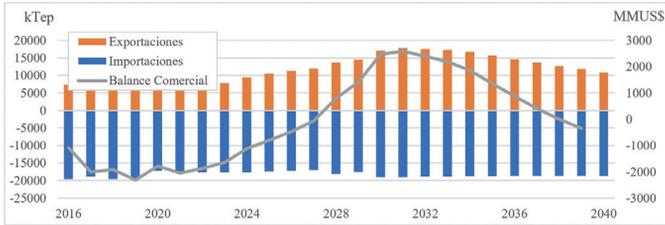
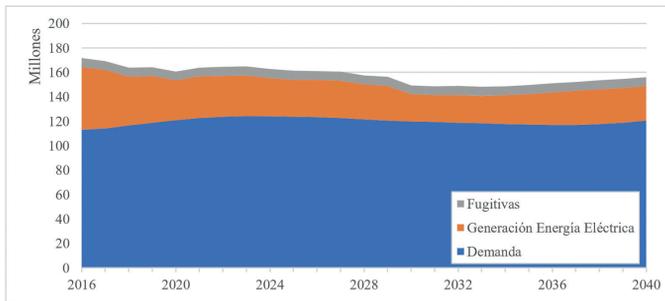


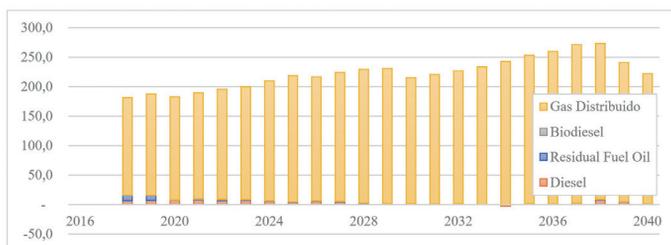
Figura 13. Emisiones Escenario Base [MM Tn eq CO2]



Escenario VIX

Comparando con el Escenario Base, vemos que la simple distribución temporal del consumo de energía por parte de los VEB reduce el consumo de combustibles, Figura 14.

Figura 14. Ahorro de Combustible Esc. Base vs VIX, [kTep]



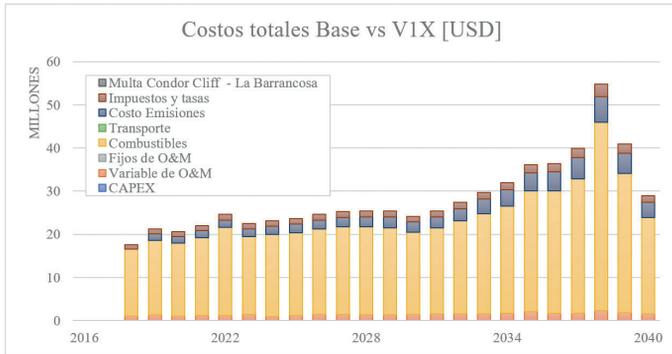
Esto lleva asociado un aumento de las importaciones de electricidad porque al ser fijo el despacho, se necesita más energía durante las horas de valle, Figura 15. Este cambio en la demanda podrá ser alimentado mediante importaciones o incorporación de generación SFV.

El *Escenario Base* consume una mayor cantidad de combustibles, paga mayores impuestos, produce más emisiones y necesita de mayor O&M que el *Esc. VIX*, Figura 15. La Figura 20 muestra que en el caso de *Carga Inteligente, importamos Electricidad, la cual sustituye en su mayoría al exportado Gas Natural*.

Nótese que no hemos puesto las importaciones y exportaciones de energía en términos monetarios (US\$), sino energéticos (kTep), ya que el mecanismo de regulación de precios escapa al alcance de este trabajo y es susceptible a ser herramienta de incentivo por parte de las autoridades correspondientes. La aplicación de instrumentos regulatorios fomentará o impedirá el desarrollo de las posibilidades aquí presentadas como escenarios. La utilización de estos instrumentos dependerá de los objetivos políticos buscados, siendo estos últimos ajenos al alcance.

Finalmente, este ahorro de combustible también tiene aparejado una leve mejora en las emisiones de GEI, equivalente al ahorro de combustibles fósiles utilizados.

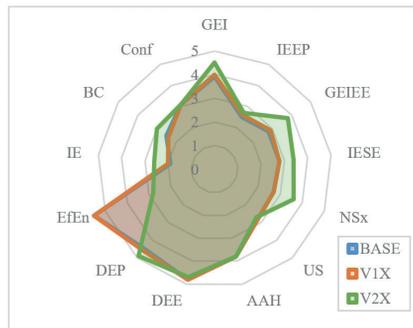
Figura 15. Comparación de costos totales del sistema



Escenario V2X

Las tendencias esbozadas en el *Esc. VIX* se ven profundizadas en este Escenario. Mejoran considerablemente los indicadores GEI, GEIIE, IESE y NSx, cayendo fuertemente el indicador de EfEn, Figura 10. Este último se ve desmejorado fuertemente debido aumento de la Demanda de Electricidad, debido a la carga en exceso de los VEB, los cuales demandan más energía que la que utilizan para viajar debido a que deben cargarse para entregar energía durante el Pico o Superpico.

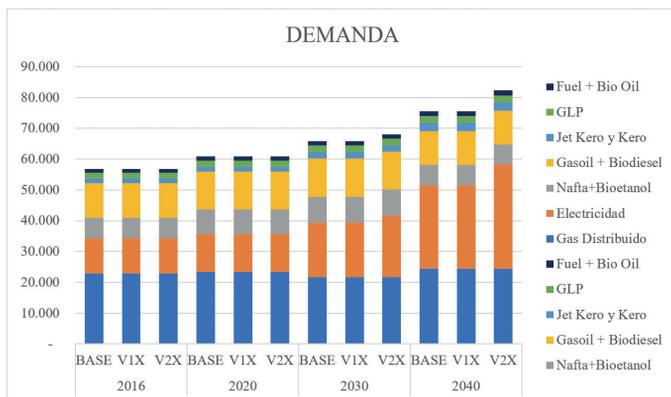
Figura 16. Consolidado de indicadores



En la Figura 17, vemos el porqué de esta disminución del indicador de Eficiencia, el crecimiento de la demanda de VE para almacenamiento tracciona el consumo de energía. Pero lo que no tiene en cuenta el indicador que esto lo

estamos haciendo con menos combustibles, Figura 19. El indicador solo mira el volumen de la demanda, por lo que si nuestro parque de generación eléctrica consume menos combustible debido a los VE no es contabilizado por este.

Figura 17. Demanda de energía [kTep]



Los costos son presentados en las Figura 18, Figura 19, Figura 21 y Figura 2.

Se puede notar que hay una tendencia decreciente en el C_{me} de la Energía Eléctrica de un Escenario al otro (Base->V1X->V2X). Se debe tener en cuenta que, recordando la Figura 11, para el año 2040 los Costos de Capital representaban alrededor del 35% del C_{me} . Esta participación es la más representativa, seguida por los Costos de Combustible (incluye importación de combustibles fósiles y electricidad) y los costos de O&M (fijos y variables).

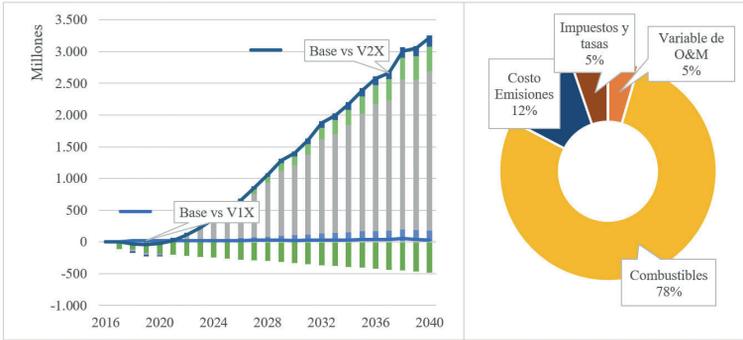
Esta estructura se repite de manera casi idéntica en los demás Escenarios, donde el cambio más significativo debido a la inserción de VE's (con V1X y V2X) se da en los costos de combustible, ya que, recordemos no estamos cambiando el Plan de Obras para el Parque de Generación Eléctrica, lo cual nos lleva a otro punto importante. El ahorro de Gas Natural (y su exportación) podría ser una solución para la reducción del C_{me} . Dicho de otra manera, las máquinas a Gas Natural tienen un menor despacho en el Escenario de V2X, por lo tanto, el GN no utilizado se exporta, Figura 20. De esta manera, se reducen las emisiones y el C_{me} . En una segunda instancia se podría pensar en directamente no instalar las centrales de punta que quedarán en desuso debido al uso de VE devengando inversiones y reduciendo el CAPEX del C_{me} .

Lo anterior, combinado con la instalación de más generación Solar FV para abastecer la carga diurna, podría significar el financiamiento de energía renovable mediante la explotación de los recursos hidrocarbúricos del país. Si el

CAPEX de la inversión renovable es menor que la necesaria para un CC convencional entonces también se mejorará el C_{me} .

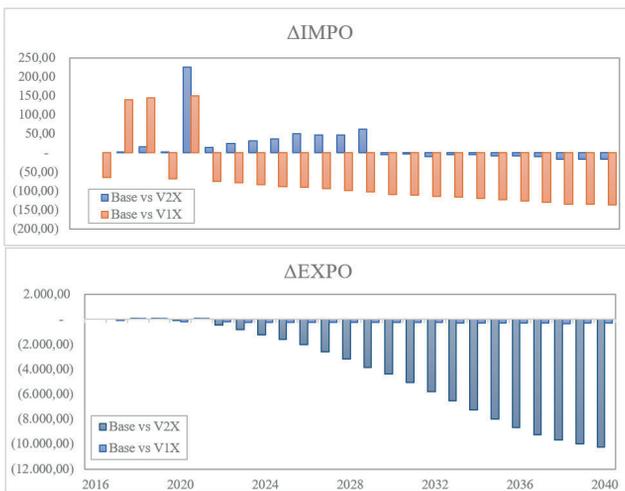
Figura 18. Comparativa de Ahorro en Ctot. Esc. Base, V1X y V2X

Figura 19. Estructura de Ahorro a 2040, Esc. Base vs V2x



Por último, queda pendiente analizar el impacto de los costos hundidos de las instalaciones existentes en el C_{me} . Estos costos hundidos pueden modificar las tendencias obtenidas debido a que el pago de capital interactúa con el Plan de Pagos implementado para los Escenarios. Este plan de pago modifica la curva presentada, rotando las tendencias obtenidas en nuestras simulaciones.

Figura 20. Balance Comercial [kTep]



4. Conclusiones

Habiéndose presentado los principales resultados obtenidos podemos concluir que hemos verificado la capacidad de los Vehículos Eléctricos a Batería de desplazar combustibles fósiles como fuente primaria de energía también se aplica al marco de los Escenarios Energéticos, presentando una oportunidad de mejora para incrementar la penetración de energía renovable (en nuestro caso en particular, Solar FV) en la matriz energética.

Estas capacidades han sido verificadas tanto para un comportamiento simplificado, en carga inteligente o como almacenamiento. Cada una con mayor potencialidad que la anterior.

En segundo lugar, también hemos *identificado* un posible *camino colaborativo conjunto entre el sector gasífero, el de las energías renovables y los fabricantes de VE*. La sustitución del consumo de Gas natural por energía eléctrica para proveer energía durante los P o SP del sistema abre el camino a la exportación masiva de ese vector energético. Quizás, hasta llegando a las escalas requeridas para un desarrollo exportador en los puertos del país (muy posiblemente Bahía Blanca). Es posible pensar en un desarrollo exportador de Vaca Muerta financie la incorporación de fuentes renovables en el plano nacional, similar a la política de desarrollo de Noruega.

En tercer lugar, podemos concluir que la *inserción de VEB en el sistema energético nacional ayuda a reducir el C_{me} de la energía*. Reducción que se ve incrementada con cada nueva funcionalidad que se les agrega a los VEB como actores activos del sistema. *Los usos presentados en nuestro trabajo deben ser incentivados, si es nuestro afán incorporar energía renovable, reducir GEI, diversificar la matriz energética (primaria y eléctrica) y consolidar la soberanía energética nacional.*

De cómo se conjuguen estos factores dependerá o no si se podrán explotar las capacidades de esta tecnología para reducir el costo medio de la energía. Y para ello primero se necesita, en nuestra opinión, la voluntad política de definir objetivos claros, cuantificables y consensuados. A partir de ello se podrá establecer una hoja de ruta para una política pública exitosa, en materia de objetivos realizados. En este momento no está en discusión si la tecnología funciona, lo que está en discusión es cómo será su integración a los sistemas existentes y si es necesario cambiar sus estructuras para permitir el cambio, inevitable y necesario, hacia un futuro más limpio, equitativo y próspero para la mayor cantidad de personas posible. Es por eso, que el espíritu de este trabajo es indicar que es lo que podría pasar en un futuro, no tan lejano, y si este es un futuro deseado es algo que deberemos decidir como sociedad de manera mancomunada.

Es necesario entender que todo esto no son más que resultados a los cuales debemos apuntar o no, dependiendo de nuestras opiniones políticas. La relación de fuerzas en el plano institucional será la que termine de definir cuáles y cómo serán los incentivos y su implementación.

Figura 21. Costos Medios de Energía Eléctrica. Esc. Base, V1X y V2X

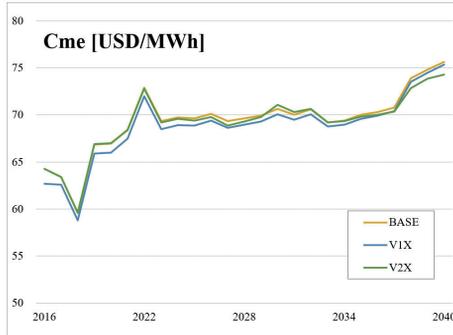
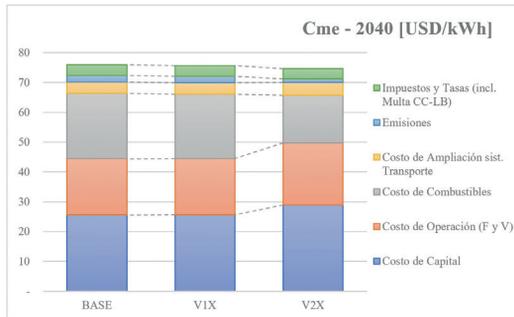


Figura 22. Estructura de Cme a 2040



5. Referencias

Banco Mundial (2019). *World Development Indicators*.
 Barbarán (2018). *Informe Final - Plataforma de Escenarios Energéticos*.
 Faria (2014). Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective. *Journal of Power Sources*.
 Fondo Monetario Internacional (2019). *World Economic Outlook UPDATE*.
 International Energy Agency (2018). *World Energy Balances*.

- McKinsey Energy Insights (2019). *World Energy Perspective*.
- Medina (2018). *Inclusión de vehículos eléctricos a batería en la Argentina*.
- Message (2014). A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels. *energies*.
- Ministerio de Energía y Minería (2017). *Plataforma de Escenarios Energéticos*.
- Morvaj (2016). Integrating Multi-Domain Distributed Energy Systems with Electric Vehicle PQ Flexibility: Optimal Design and Operation Scheduling for Sustainable Low-Voltage Distribution Grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*.
- Pasaoglu, G., D, F., L, Z., A, M., A, Z., y C, T. (2013). *Projections for Electric Vehicle Load Profiles in Europe Based on Travel Survey Data*. Institute for Energy and Transport, Joint Research Centre,, European Commission.
- Sumedha Rajakaruna, F. S. (2015). *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Charging Strategies*. Perth: Springer.
- Sumedha Rajakaruna, F. S. (2015). *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Energy Management*. Perth: Springer.
- Sumedha Rajakaruna, F. S. (2015). *Plug In Electric Vehicles in Smart Grids - Integration Techniques*. Perth: Springer.
- Tan (2016). Integration of electric vehicles in smartgrid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Tomic (2007). Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources*.
- Wood Mackenzie Power & Renewables (2019). *U.S. energy storage monitor*. Obtenido de woodmac.com.

ESTRATEGIA Y HOJA DE RUTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE CARGA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN TRANSPORTE PÚBLICO

Lucas Andrés Ferrari

Resumen

Se realizó un trabajo de investigación en el que se generó una herramienta para tomadores de decisiones de alta jerarquía sean estas públicas o privadas. A razón de que la movilidad eléctrica en la Argentina está comandada por ambas partes. Este modelo se enfoca en analizar multidimensionalmente aspectos presupuestarios, técnicos, ambientales, ponderaciones de factores y utilización de la tecnología disponible para generar la mejor decisión a tomar según distintos criterios de decisión.

1. Introducción

El siguiente trabajo profesional busca dar una solución a los tomadores de decisiones que se encargan de determinar la política pública y privada a afrontar para la incorporación de vehículos eléctricos en distintas ciudades.

Para poder desarrollarlo buscamos construir una herramienta que pueda analizar distintas facetas que involucran esta temática, específicamente con colectivos eléctricos sean 100 % eléctricos o de menor porcentaje.

La herramienta se diseñará para encontrar la mejor opción de hacerlo de acuerdo con ciertos criterios establecidos que serán detallados en el desarrollo de este y a las restricciones propias del contexto, sean de los fabricantes o de las locaciones.

Probaremos con datos reales el modelo para brindar soluciones de acuerdo con los datos recolectados y, por último, analizaremos las bases que tomamos como piedras fundamentales de nuestros análisis.

Origen del trabajo

El presente proyecto, titulado “Estrategia y hoja de ruta para la implementación de una red de carga para vehículos eléctricos en transporte público

(estaciones en centros de trasbordo, carga de oportunidad y terminales comunes)”, forma parte de un vector sobre Movilidad Eléctrica propuesto por la cátedra de Trabajo Profesional de Ingeniería Industrial. Este está en articulación con los siguientes programas:

- Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Transporte (PIUBAT), enfocado al transporte general en la Argentina.
- Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Cambio Climático (PIUBACC), enfocado en las emisiones de contaminantes y su impacto en el cambio climático.
- Programa Interdisciplinario de la UBA sobre Energía Sustentable (PIUBAES), enfocado en la generación, distribución y almacenamiento de la energía.
- Programa Interdisciplinario de la UBA para el Desarrollo (PIUBAD), enfocado en los distintos tipos de modalidades de transporte urbano.

Objetivo

Confecionaremos una herramienta de toma de decisiones para la implementación de buses eléctricos en el transporte público. Buscará dilucidar los interrogantes de dónde, cómo, quiénes, cuándo y por qué se ejecuta la hoja de ruta de referencia.

Alinearemos las respuestas a la optimización de costos y beneficios contemplando que el foco de esta herramienta sea la visión holística de los factores que rodean a la movilidad eléctrica en el transporte público, manteniendo la posibilidad de utilizar esta herramienta en diferentes alcances o locaciones, meramente ajustando los factores a analizar para el nuevo contexto.

2. Metodología

El carácter de esta herramienta es un modelo de investigación operativa en el que se contemple de forma simultánea diferentes variables, restricciones, parámetros, hipótesis y contextos que consideraremos necesarios y suficientes para la toma de decisiones utilizando como punto de partida las investigaciones realizadas en los siguientes TP profesionales:

- *“Electrificación de buses de líneas de jurisdicción nacional: planificación e implementación analizando el impacto económico y energético” (Nicolás Girado y Sebastián Canziani - 2019).*
- *“Análisis de factibilidad de la producción nacional de buses urbanos 100% eléctricos” (Joaquín Chazarreta, Mariela Chhab y Patricio Priano – 2020.*

El *núcleo fundamental del TP* estará basado en el diseño de un “Modelo de modelos” el cual contará de tres modelos secuenciales.

El primero es el *Modelo Rankeador*, el cual selecciona mediante criterios elegidos (detallados en el desarrollo) y un presupuesto limitante, el porcentaje a electrificar de las mejores líneas.

El segundo es el *Modelo Técnico y Locador*, el cual para las líneas seleccionadas por el Rankeador selecciona las posibles combinaciones aptas entre Bus-Cargador junto con la locación de los cargadores.

El tercero es el *Modelo Financiero*, este selecciona el o las mejores combinaciones Bus-Cargador de acuerdo con flujos de fondos, financiamientos, descuentos por cantidad y limitantes de flujos anuales para cada línea.

Considerando que lo primordial del trabajo son los modelos que se detallan más adelante, centraremos nuestros esfuerzos en el diseño y realización de estos.

La estructura de confección del siguiente trabajo de investigación consta de *siete pasos* fundamentales con sus respectivos análisis, los cuales se desarrollarán *a posteriori*.

Pasos:

1. Investigación
2. Relaciones entre variables
3. Diseño del Modelo
4. Puesta en Marcha
5. Análisis de Sensibilidad
6. Cuestionando las Bases
7. Conclusiones

Variables y parámetros por considerar

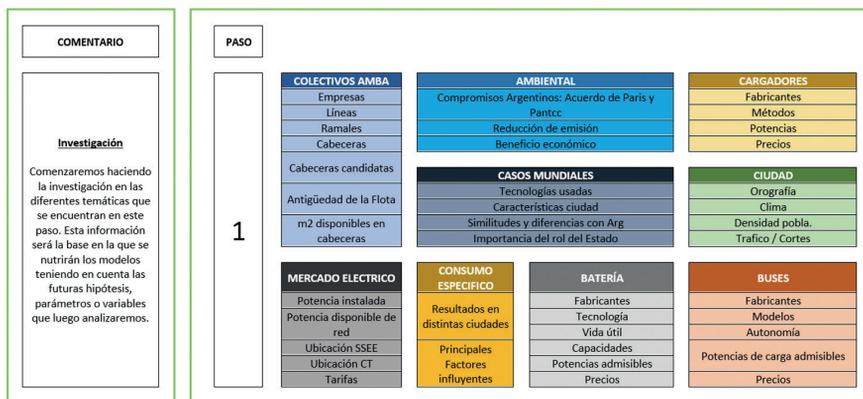
Agente	Categoría	Subcategoría	Descripción	Variable	Parámetro que condiciona a la variable	
Buses	Líneas	Ramales	Cantidad y eficiencia de recorridos	Números de recorridos y eficiencia de estos	-	
			Densidad de líneas	Flujo de buses que circulan por X recorrido	-	
	Autonomía	Distancia efectuada en el recorrido	Batería que debe restar para ir a la estación de carga	km recorridos en el circuito por el ramal i de la línea i	-	
			Fallas	% de reserva de batería	-	
		Tamaño de batería	Porcentaje de viajes que no se completan por batería agotada	Costo de falla (Remolque, transportar pasajeros en otro bus, etc.)	Coef. Seguridad que contempla la degradación de la batería	
			Vida útil de batería	kWh acumulable por la batería	Costo de kWh consumido de la red	
	Unidades	Batería	Frecuencia de mantenimiento de BEB	Años operativos batería	Valor residual Batería	
			Frecuencia de mantenimiento de PHEB	Número de mantenimientos BEB por unidad de tiempo	Costo de mantenimiento BEB	
		Tipo de Bus	Tecnología utilizada según requerimientos	Número de mantenimientos PHEB por unidad de tiempo	Costo de mantenimiento PHEB	
			Vida útil de BEB	BEB	Costo de BEB	
Empresas	Líneas	Tipo de Bus	Vida útil de PHEB	PHEB	Costo de PHEB	
			Años promedio de todos los buses de una línea	Años operativos BEB	Valor residual BEB	
		Características	Barrios por donde pasarían estos colectivos para beneficio ambiental	Años operativos PHEB	Valor residual PHEB	
			Inversiones efectuadas en los últimos años	Antigüedad de la Flota de buses	-	
	Líneas	Características	Operadores	Densidad poblacional por donde pasan los colectivos	Coeficiente de mejora ambiental	
			Contrato de concesión	USD invertidos por unidad de tiempo	-	
		Líneas	Características	Operadores	Número de operadores	Costo por operador
				Contrato de concesión	Vencimiento del contrato de concesión con el Estado	-

Estrategia y hoja de ruta para la implementación de una red de carga para vehículos...

Infraestructura	Candidatas a CC	Tipo de cabecera	Cabecera compartida Cabecera en vía pública Cabecera privada	- - -
		Carga de batería	Tipo de carga	Carga lenta Carga rápida
	Centros de carga (CC)		Cantidad de cargadores de CARGA LENTA (CL) por Cci	Número de cargadores de CL por Cci
		Cantidad de cargadores de CARGA RÁPIDA (CR) por Cci	Número de cargadores de CR por Cci	Costo por CR
		Frecuencia de carga por cargador	Cantidad de veces que los colectivos cargan por día en ese cargador	-
		Frecuencia de Mantenimiento de Centro de Carga	Número de mantenimientos por unidad de tiempo	Costo de mantenimiento de Centro de Carga
	Instalaciones	Locación de Candidatos a Centros de Carga	Ubicación de Centro de carga elegido	-
		Lote disponible y Edificación	m ² disponibles de la Cabecera i de la línea j	-
		Potencia de Cargador Lento	Potencia utilizada para cargar una batería por carga lenta	-
		Potencia de Cargador Rápido	Potencia utilizada para cargar una batería por carga rápida	-
Tiempo de uso de cargadores		horas operativas del cargador	-	
Planificación	Vida útil de Centros de Carga	Años operativos de Centros de Carga	Valor residual Centros de Carga	
	Horario de carga	Diurno Nocturno	Costo Eléctrico por carga Diurna Costo Eléctrico por carga Nocturna	
	Subestaciones próximas a las Cabeceras	metros entre SSEE y Cabecera	Costos por distancia entre la SSEE y la Cabecera	
Subestaciones	Potencia disponible	Potencia disponible en nodo o subestación al que el centro de carga irá conectado	-	

Variables Externas	Ambientales	Beneficios a la comunidad	Reducción de emisiones por cambio de tecnología	Cantidad de emisiones evitadas por colectivo eléctrico	Beneficio económico por esas emisiones no efectuadas
			Clima local	Consumo de batería por Climatización térmica en verano o invierno	-
	Baterías	Consumo	Orografía de la Ciudad	Pendiente del recorrido	Consumo específico por pendiente del recorrido promedio
			Pasajeros	Porcentaje de ocupación del colectivo	Consumo específico por cantidad de pasajeros
				Utilización de la carga de celulares por energía del colectivo	Consumo específico por cantidad de teléfonos cargando
	Contexto Social	Demoras	Cortes	Cantidad de Cortes	Coef. Seguridad que contempla los cortes
			Desvíos por accidentes	Cantidad de accidentes	Coef. Seguridad que contempla los desvíos por accidentes
			Piquetes	Cantidad de piquetes	Coef. Seguridad que contempla los piquetes
	Financiero	Parámetros	Valor tiempo del dinero	Tasa de Interés	-
Fundamental para ver la competitividad de los buses eléctricos vs. los buses diésel				-	
TCO			Subsidios o Incentivos posibles	-	

Paso 1 (Investigación)



Análisis de investigación

Según las categorías mencionadas, analizaremos las variables a considerar para el modelo con sus respectivas hipótesis, fuentes y definición de estas buscando definir la estructura de los datos que luego servirán de *inputs* para el Modelo.

1. COLECTIVOS AMBA

1.1. Empresas de buses

Seleccionada para el modelo: no consideramos relevante integrar las diferentes empresas para el modelo, ya que no afectaría la selección de la tecnología a utilizar.

1.2. Líneas de buses

Seleccionada para el modelo: se utilizará para todos los modelos una variable que identifique a cada una de las líneas.

1.3. Ramales de líneas

Seleccionada para el modelo: definiremos una variable que identifique a cada ramal correspondiente a cada línea

1.4. Recorridos de los ramales

Seleccionada para el modelo: variable utilizada en el modelo Rankeador, teniendo en cuenta el beneficio ambiental por circular por zonas más densamente pobladas.

1.5. Distancia efectuada por recorrido

Seleccionada para el modelo: importante valor a considerar correspondiente a cada ramal de cada línea. Utilización en modelo Rankeador y de Selección.

1.6. Eficiencia de recorridos por ramal

Seleccionada para el modelo: se considera como otro factor influyente para la línea seleccionada a electrificar ya que podría beneficiar a otras líneas de colectivo usar esa carga o también que estos recorridos están estudiados por su impacto en la sociedad. Consideramos que puede ser otro componente más para complejizar el modelo, no la utilizaremos en esta etapa ya que usaremos otras más relevantes.

1.7. Densidad de ramales

Seleccionada para el modelo: variable a considerar en Modelo Rankeador, electrificando zonas donde haya más densidad de ramales, disminuyendo la contaminación en zonas críticas. Se incluye este factor en el modelo dentro del coeficiente ambiental.

1.8. Pasajeros promedio por colectivo

Seleccionada para el modelo: este factor afecta al consumo específico, del cual hay pocos estudios prácticos sobre este coeficiente por lo que utilizaremos los datos a nuestro alcance.

1.9. Antigüedad de flota de buses

Seleccionada para el modelo: es uno de los posibles criterios a utilizar para el modelo Rankeador, comenzando a electrificar las líneas que mayor antigüedad tengan. Es un Valor no una variable.

1.10. Cabeceras

Seleccionada para el modelo: se seleccionarán las cabeceras candidatas y se utilizarán en el modelo de localización.

1.11. Contratos de concesión

Seleccionada para el modelo: no se tendrá en cuenta para el modelo debido a la irregularidad con la que se manejan las Empresas de Colectivos y la difusa relación con el Estado. Actualmente, las concesiones se renuevan automáticamente sin análisis intermedio por esto no se utilizará en el modelo.

1.12. Inversiones en los últimos años

Seleccionada para el modelo: se utilizará para el modelo Rankeador en el que, según algún criterio, se priorizará de acuerdo con la inversión efectuada en un periodo.

2. CARGADORES

2.1. Fabricantes

Seleccionada para el modelo: variable de identificación para el modelo Técnico y Locador.

2.2. Modelos

Seleccionada para el modelo: variable de identificación para el modelo Técnico y Locador.

2.3. Métodos

Seleccionada para el modelo: no es relevante para el modelado, pero sí impacta en el precio de los cargadores.

2.4. Potencias

Seleccionada para el modelo: valor asociado a cada modelo de cada empresa utilizado para el modelo Técnico y Locador.

2.5. Cantidad de cargadores

Seleccionada para el modelo: variable utilizada en el modelo Técnico y Locador. El modelo analiza las distintas variables de cargadores asociados a los posibles modelos de buses, y selecciona la mejor combinación con un determinado número de buses y cargadores optimizando costos.

2.6. Precios

Seleccionada para el modelo: importante valor a utilizar en el modelo Técnico y Locador. Asociado a cada modelo de cargador propio de cada fabricante. En caso de no contar con valores de precios específicos tomaremos como hipótesis los precios aportados por Bloomberg.

3. BUSES

3.1. Fabricantes

Seleccionada para el modelo: variable de identificación para el modelo Técnico y Locador.

3.2. Modelos

Seleccionada para el modelo: variable de identificación para el modelo Técnico y Locador y para el Financiero.

3.3. Capacidad batería

Seleccionada para el modelo: variable de identificación para el modelo Técnico y Locador.

3.4. Batería remanente antes de carga

Seleccionada para el modelo: la utilizaremos para el modelo Técnico y Locador.

3.5. Vida útil batería

Seleccionada para el modelo: específicamente para el modelo tenemos la restricción que los buses no pueden tener más de 10 años de antigüedad, por lo que la batería no afectaría en esta métrica. No utilizaremos esta variable directamente en el modelo.

3.6. Autonomía

Seleccionada para el modelo: si la utilizaremos para el modelo en el T.L.

3.7. Cantidad de viajes no completados por batería agotada

Seleccionada para el modelo: esta variable sería considerada para el modelo Financiero en el que vemos la probabilidad de falla de acuerdo con cada recorrido de las líneas y con eso podemos asignarle un costo,

- viendo cómo afecta esto en el FF. Por el momento, no ingresará el desagregado de ese análisis en el modelo financiero.
- 3.8. Potencia de carga admisible
Seleccionada para el modelo: utilizaremos esta potencia cruzándola con la que entrega del cargador, según el contexto.
 - 3.9. Mantenimiento
Seleccionada para el modelo: consultando con los especialistas los mantenimientos son realizados por las empresas que venden el bus por lo que no contamos con esos datos para compararlo, también se podría complejizar el modelo Financiero agregándolo en el caso de que sea significativo o distinto por tecnología o tipo de bus.
 - 3.10. Precios
Seleccionada para el modelo: utilizaremos el precio en el modelo Financiero.
4. Mercado Eléctrico
 - 4.1. Potencia instalada
Seleccionada para el modelo: al tener capacidad ociosa no afectaría a los resultados que podría arrojar el modelo por lo que no la utilizaremos.
 - 4.2. Ubicación de subestaciones
Seleccionada para el modelo: considerando el análisis hecho en el TP citado, gracias al gran volumen de SSEE en la región la distancia entre ellas no es significativa para considerarlo en donde alocarlo.
 - 4.3. Potencia disponible en subestaciones
Seleccionada para el modelo: esa potencia disponible de 2MW sería suficiente para cualquier centro de carga de 15-20 buses, por lo que no sería una restricción por considerar y no ingresaría como variable al modelo.
 - 4.4. Ubicación centros de transformación
Seleccionada para el modelo: no se considerará en el modelo, ya que estas no varían según la línea, tecnología o estrategia utilizada.
 - 4.5. Tarifas
Seleccionada para el modelo: se utilizará las tarifas para afectar el FF de acuerdo con la decisión tomada o por tomar.
 5. Ambiental
 - 5.1. Compromisos argentinos
Seleccionada para el modelo: se seleccionará una variable ambiental para el modelo Rankeador.
 - 5.2. Emisiones evitadas por el cambio de tecnología
Seleccionada para el modelo: se utilizará en el modelo para el Rankeador.
 6. CIUDAD
 - 6.1. Orografía

Seleccionada para el modelo: este factor afecta al Consumo Específico, nosotros partiremos de uno y luego analizaremos su sensibilidad frente al modelo.

6.2. Tráfico/cortes

Seleccionada para el modelo: este factor está dentro de la probabilidad de que un bus no llegue a completar su destino, por lo que no ingresará al modelo.

6.3. Clima

Seleccionada para el modelo: este factor afecta al Consumo Específico, nosotros partiremos de uno y luego analizaremos su sensibilidad frente al modelo.

7. Infraestructura

7.1. Frecuencia de carga de los colectivos

Seleccionada para el modelo: se utilizará este factor para el modelo técnico y locador (MTL) y para el modelo financiero (MF).

7.2. Número de mantenimientos

Seleccionada para el modelo: consultando con especialistas el mantenimiento eléctrico no varía según el contexto, por lo que no ingresará en el modelo. En el caso que si lo fuera se podría colocar como los flujos de fondos en el MF complejizando el modelo esto escapa al análisis.

7.3. Tiempo de carga de los colectivos

Seleccionada para el modelo: se utilizará esta variable para el MTL y el MF.

7.4. Vida útil cargador

Seleccionada para el modelo: la vida útil del cargador no tiene gran afectación para el horizonte de tiempo que manejamos en el análisis, por lo que queda fuera del análisis.

7.5. Franja horaria de carga

Seleccionada para el modelo: se analizará cuando carga y en relación con el tiempo de carga, esto afectará la decisión en el MTL y en el MF.

7.6. Distancia entre SSEE o CT y cabecera

Seleccionada para el modelo: AMBA cuenta con más de 90 SSEE y más de 36 mil CT con su respectivo tendido eléctrico, no será un problema en cuanto a instalación y los costos de estos no diferirán entre tecnologías y ubicaciones a designar además el costo de la instalación correría por cuenta de la distribuidora que queda por fuera del análisis por lo que no se utilizará en el modelo.

7.7. Metros cuadrados disponibles en cabeceras

Seleccionada para el modelo: consultando con especialistas y con entidades gubernamentales no tienen el dato registrado de los metros

cuadrados por cabecera disponible. Por lo que si lo tuvieran y se considera el espacio para cargar los buses se podría contemplar y descartar opciones de carga no válidas.

8. Financiero

8.1. Tasa de Interés

Seleccionada para el modelo: se utilizará la tasa de interés para realizar el FF del MF.

8.2. TCO (no sería variable sino un resultado)

Seleccionada para el modelo: se utilizará como variable decisión en el MF.

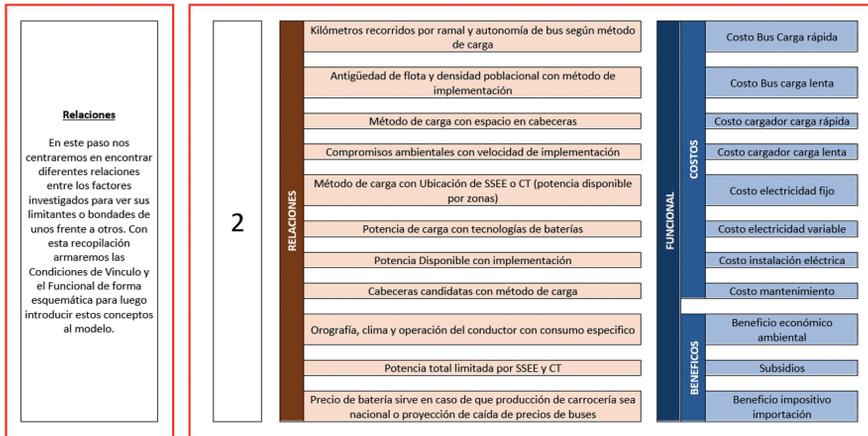
8.3. Subsidios/incentivos

Seleccionada para el modelo: en el caso de que contemos con el acceso a esta información, ya que consultando con especialistas en intrincado el acceso a esa información, se podría colocar en el modelo financiero, solo suma complejidad.

En cuanto al *Consumo Específico*, según la bibliografía puede variar desde 1,2 a 4,8 de acuerdo con diferentes factores externos y propios de la tecnología de la batería, en nuestro caso lo consideraremos tomando una locación similar a AMBA con ciertos criterios que tomaremos y asignaremos ese valor como Consumo Específico para luego en el paso 4 (análisis de Sensibilidad) mostrar cómo se alteraría el resultado que arroja el modelo con la variación de este coeficiente.

Para los *Casos Mundiales* hicimos una investigación en cuanto a cómo se está llevando a cabo la integración de movilidad eléctrica en el mundo, cuáles fueron sus resultados, ventajas y desventajas. Este estudio fue fundamental para comprender el panorama global y ver que se está haciendo en la actualidad, nos brindó una panorámica completa que apuntaló la visión global que tendrá el modelo. Estos casos mundiales se encuentran estudiados en los TP Profesionales que mencionamos anteriormente por lo que no profundizaremos en su detalle. Si bien nos resultó crucial para el entendimiento de la temática, no ingresará como una variable ni será parte del modelo más allá que utilizaremos las características de las locaciones para definir el coeficiente de Consumo Específico.

Paso 2 (Relaciones)



En el cuadro mostrado podemos ver diferentes posibles relaciones a modo de ejemplo.

Según nuestros análisis y entrevistas con especialistas del sector, seleccionamos las que consideramos de mayor relevancia, mayor impacto y correcta ejecución para estos modelos.

A continuación, las desarrollamos en función de las variables que se necesitan para cada modelo:

Modelo Rankeador:	Modelo Técnico y Localizador:	Modelo Financiero:
Líneas	Fabricantes de buses	Potencia según estrategia
Ramales	Tipos de buses	Estrategias
Flota	Modelos	C.E.
Antigüedad de la flota	Capacidades	Línea
Comunas por donde pasa la línea	Potencia admisible	Flota por electrificar
Habitantes por comuna	Precio	Interés por financiación
Inversiones por línea	Fabricantes de cargadores	Precios
Tecnología del bus	Tipos de cargadores	Descuentos por cantidad
% eléctrico del bus	Modelos	Financiaciones
Emissiones no emitidas CO ² por km	Potencia máxima	Horas de carga
Emissiones no emitidas CO ² + Gases por km	Precio	Buses
Presupuesto disponible	Líneas	Cargadores
Costo semilla (explicado a continuación)	Ramales	Número de combinación B-C
	Frecuencia	
	Flota por electrificar	
	Km diarios promedio	
	Km ida	
	Km vuelta	
	Tipo de bus para electrificar	
	Tiempos disponibles según estrategia	
	Estrategias	
	Consumo Específico (C.E.)	
	% utilización de la batería Cabeceras por línea	
	Disponibilidad para cargar en cabeceras	

Todas estas variables se verán en el Excel de Modelos y cómo interactúan entre ellas, de acuerdo con cada etapa del análisis.

Estas relaciones se fueron confeccionando de acuerdo con un “sistema de filtros” que diseñé en el que fui priorizando distintas etapas de acuerdo con

la visión macro hasta llegar a la visión micro. Principalmente tenía que saber qué línea de colectivo era la mejor para comenzar a electrificar de acuerdo con algún criterio elegido, por lo que tenía que tener las variables de decisión para los criterios y luego debía tomar las variables que afectasen a las líneas para decidir cuál/es quedarían seleccionadas. El segundo paso, ya teniendo la línea y teniendo la investigación de mercado de la tecnología disponible, es analizar todas las posibilidades aptas para las condiciones de borde de esa línea elegida. Por último, con la línea elegida, las tecnologías y estrategias posibles analizaría según mis restricciones económicas/financieras cuál debería ser la mejor compra por lo que considerar variables de esa índole en ese análisis.

Paso 3 (Diseño del “Modelo de Modelos”)

Antes de realizar el desarrollo del “Modelo de Modelos”, analizaré el título del TP con sus palabras clave para mostrar qué incógnitas responde cada una y en qué modelo se responderán.

Título: “Estrategia y hoja de ruta para la implementación de una red de carga para vehículos eléctricos en transporte público (estaciones en centros de trasbordo, carga de oportunidad y terminales comunes)”

Analizando con las palabras “Estrategia” y “Hoja de ruta” estas responden a las siguientes incógnitas:

Estrategia: Plan general de 1 o más objetivos

1. ¿Qué líneas voy a electrificar para que tenga el mayor impacto? (*A Posteriori* definiremos qué es Impacto y cómo se ve representado la búsqueda de su maximización)
2. ¿En qué proporción voy a hacerlo?
3. ¿En qué orden?

Estas incógnitas serán respuestas por el **modelo Rankeador**.

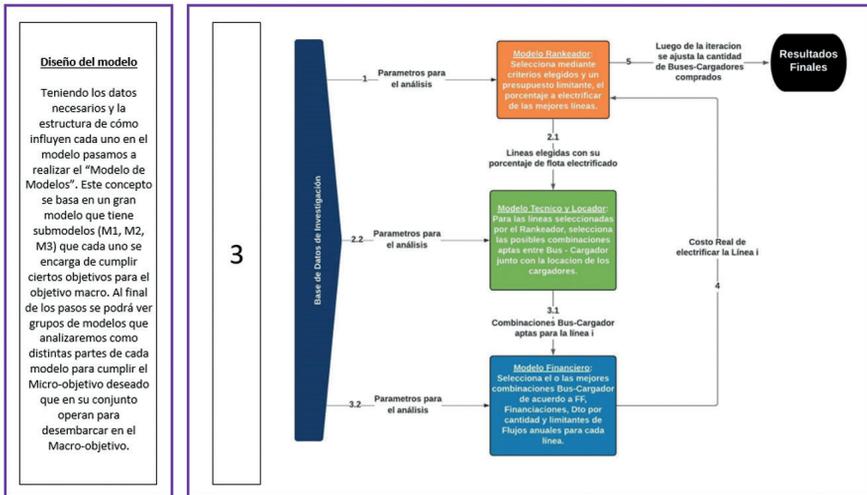
Hoja de Ruta: Instrucciones de cómo implementarlo

1. ¿Qué marca, modelo y cantidad de buses voy a comprar, según sus características?
2. ¿Qué marca, modelo y cantidad de cargadores voy a comprar, según sus características?
3. ¿Dónde voy a ubicar los cargadores y con qué estrategia de carga, según las restricciones de las condiciones de borde?

Estas incógnitas serán respuestas por el **modelo Técnico y Locador**.

4. ¿Con qué financiación voy a comprar los buses y cargadores?
5. ¿Con qué descuento por cantidad voy a comprar los buses y cargadores?

Las incógnitas 4 y 5 buscarán tener el mejor impacto financiero/económico de acuerdo con las restricciones de contexto y serán respuestas por el **modelo Financiero**.



Modelo Rankeador

Este modelo se utilizará para Rankear las líneas de colectivo candidatas según algún criterio como puede ser beneficios ambientales por electrificación, o cantidad de pasajeros transportados, eficiencia de recorridos, barrios por donde circula, antigüedad de la flota, inversión por año, etc. Eligiendo con qué línea empezar para que traiga el mayor impacto electrificar su flota (o una parte de ella).

Modelo Técnico y Locador

Tomando las líneas seleccionadas en el modelo Rankeador analizaremos las posibles estrategias de carga de acuerdo con las condiciones de los recorridos de esa línea, las especificaciones técnicas de las unidades y cargadores, como potencia admisible, máxima, capacidad, entre otras. Resultando las combinaciones bus-cargadores aptas para el recorrido analizado se pasará al modelo Financiero.

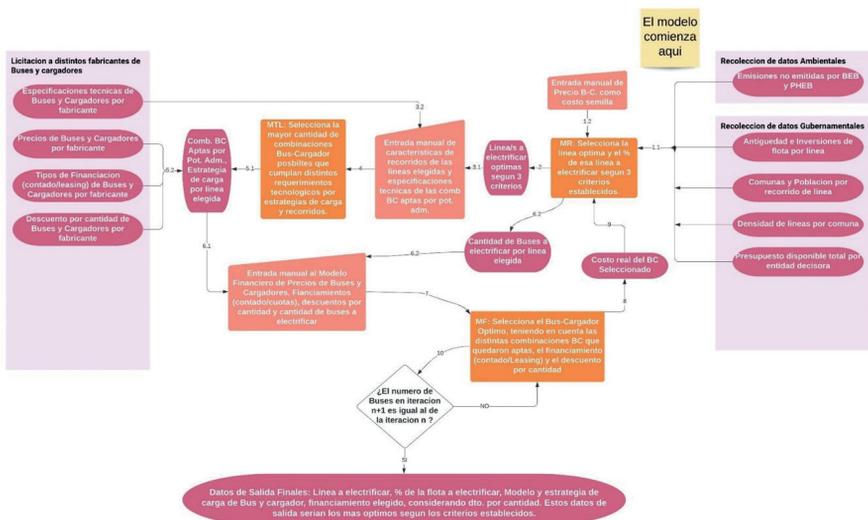
Modelo Financiero

En este modelo lo que buscamos es tener el mayor beneficio monetario, tendremos en cuenta los diferentes costos asociados a cada estrategia de carga, las financiaciones posibles por proveedor, los descuentos por cantidad y las restricciones de borde limitante en el correr de los años. Estos datos serán representados por Flujos de Fondos que se utilizarán para el análisis de programación a partir de la elección de la mejor de todas las opciones que resultaron de acuerdo con todas las opciones filtradas previamente.

Iteraciones del Modelo de Modelos

Con estos resultados de esta primera pasada se tendrán que hacer las iteraciones necesarias entre el Modelo Financiero y el Rankeador para encontrar la cantidad de buses óptimas, la variable de corte de las iteraciones se da cuando el resultado $n+1$ no varía al resultado n .

Detalle Flujograma de Modelos



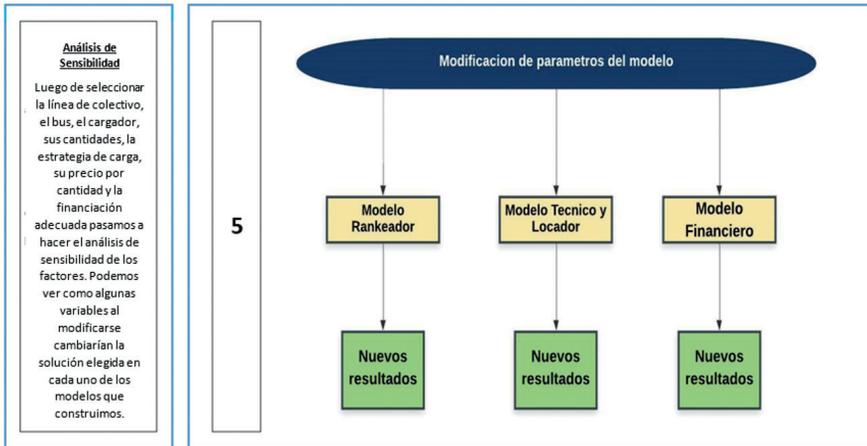
Paso 4 (Puesta en Marcha)



En este paso lo que se buscó es palpase de la realidad teniendo contacto con los actores fundamentales del rubro de la Argentina. Recolectamos la información disponible y pusimos a prueba el modelo, realizamos los ajustes adecuados y mostramos las soluciones obtenidas de acuerdo con la información disponible.

Gracias a los datos tomados y la puesta en marcha se logró corregir unos pequeños errores en algunas formulaciones del Excel, pero el esquema general, el modo de atacar el problema y las fórmulas se mantuvieron iguales. Se pudo validar el modelo probándolo con variantes sencillas y mostrando los resultados.

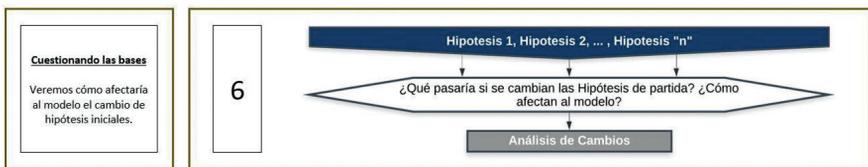
Paso 5 (Análisis de Sensibilidad)



Teniendo el modelo testeado pasamos a hacer alteraciones en los parámetros de los modelos teniendo en cuenta a cada uno de ellos y tomando nota de las alteraciones de acuerdo con la información recabada.

Este apartado mostró la potencialidad de los modelos y la rápida ejecución de las variantes con la respuesta con gran velocidad. Se puede ver cómo las decisiones enfocadas en distintos ángulos traerán distintas soluciones, a su vez si cambia el contexto también se pueden ver los cambios. Esto último es considerable si se utiliza el modelo para otras regiones o locaciones, poder tener la visión global mejora la aplicabilidad de este.

Paso 6 Hipótesis



Hipótesis:

1. En nuestro análisis de carga si bien analizamos cómo se puede redirigir la carga de un bus a otro por medio de la programación de los cargadores, no analizamos la carga inteligente en la que de acuerdo con la franja horaria o a la demanda eléctrica el cargador puede enviar más o menos potencia para aumentar el beneficio. También quedó fuera de alcance en este ámbito de carga inteligente la curva de carga de la potencia a suministrar por el cargador a la batería, siempre se tomó la potencia máxima de acuerdo con el contexto a cargar.
2. Para los costos de mantenimiento, tomamos como hipótesis que no variaba entre tecnologías BEB, nuestros análisis también contemplaban tecnologías PHEB por lo que entre cada una de ellas también se podrían considerar distintos costos de mantenimiento, en la actualidad solo se cuentan con buses para la línea 59 y son BEB, por lo que no contamos con información para ese contraste entre tecnologías, pero sería interesante poder recolectar la mayor cantidad de información para realizar el FF adecuado y tomar una decisión pertinente.
3. En cuanto a la definición de las cabeceras primarias y secundarias, tomamos las definiciones explicadas en el desarrollo del TP, estas no están bien definidas según las entidades que realizaron el relevamiento, sería interesante tomar este relevamiento de forma exhaustiva, ya que las líneas de AMBA tienen

una gran complejidad y se pueden realizar análisis más asertivos de acuerdo con la información de entrada que se tome.

4. Tomando la hipótesis de que no habría problemas de potencia solicitada vemos que el modelo no tiene este componente limitante. Analizando con los especialistas vemos que la matriz energética y las instalaciones podrían administrar la potencia adecuada.
5. En cuanto a las cabeceras disponibles para colocar cargadores, el modelo no discrimina si hay algún factor externo para no contemplar una locación posible para poder cargar el bus, en este apartado es necesario la visión del analista de realizar una investigación para ver si esa locación es apta para poner los cargadores, simplemente el modelo posee un *display* en el que se marca si es posible o no cargar en ese lugar y habilita o deshabilita algunas partes del modelo. Se podría realizar de forma automática, si se contara con esa información de campo.
6. Los buses de una misma línea hoy en día se utilizan para todos los recorridos disponibles, esto lo que produce es un desgaste uniforme y que todos los buses sirvan para cualquier recorrido.
7. Trabajaremos sobre cabeceras/terminales ya existentes, y no analizaremos la creación de nuevas terminales que incluyan varias líneas y cambien el sistema de transporte actual. En muchos países del mundo se crearon nuevas terminales, pero el transporte en esos lugares es público, por lo cual es mucho más sencillo la implantación del rediseño, en nuestro país en cambio, está concesionado a empresas privadas y no hay la suficiente incidencia sobre estas, ya que el otorgamiento de las concesiones son instantáneas.

Falta de información:

1. En cuanto al análisis del consumo específico, tenemos diferentes valores tomados del proyecto ZeUS, pero ningún dato de campo ya que es nuevo el proyecto de la línea 59. Tener en cuenta que, según lo hablado con los especialistas, el cargador tiene una gran cantidad de indicadores, entre ellos la potencia que entrega y el tiempo en que lo hace por lo que con eso podríamos sacar la capacidad que consume el colectivo y con los Km recorridos por el GPS que contiene la unidad.
2. Actualmente no se posee un registro de las concesiones, ya que estas se otorgan de forma instantáneas sin ningún análisis previo de cuál sería la mejor empresa para poder tomar esa responsabilidad.

Alcance:

1. *Legal:* en cuanto al ámbito legal, sería interesante ver las normativas vigentes en cada locación posible de centro de carga. Analizaríamos según la línea

elegida y su electrificación todos los componentes jurídicos y legales que implican tener las instalaciones eléctricas en estos centros de carga. Por otro lado, al quedar fuera del modelado la carga de oportunidad por las razones explicadas anteriormente, este tipo de estrategia requiere un análisis exhaustivo ya que sus altas potencias y sus locaciones en partes del recorrido que no necesariamente son los extremos, se debería analizar diferentes cuestiones de potencia disponible según los nodos tomados, legislación sobre seguridad de instalaciones al tener un flujo elevado de personas que estarían expuestas a estas instalaciones.

2. *Rediseño de recorridos*: en cuanto a los recorridos, es importante destacar que dentro del planeamiento urbano y los recorridos de las líneas, contamos con cierto porcentaje de capacidad ociosa en las unidades que se encuentran circulando y también contamos con sobresaturación de las unidades en horarios pico, por lo que es importante hacer un estudio de los recorridos, con los horarios de utilización de las unidades de acuerdo con horarios pico, valle o circulación normal.
3. *Carga de oportunidad*: si bien se analizó este tipo de estrategia, esta quedó por fuera de la operatoria normal del modelo de modelos por lo explicado en el apartado de carga de oportunidad, pero en el caso de querer analizarla se tendría que realizar un análisis de los centros de carga, su disponibilidad de carga, la amortización de ese cargador con esa estrategia según el flujo de buses eléctricos que pasen por él y también los costos económicos y financieros por tener ese tipo de tecnología.

Paso 7 Conclusiones



Con el análisis hecho y la herramienta finalizada, podemos ver que sería de gran utilidad para un tomador de decisiones, considerando distintos criterios de evaluación, las posibilidades que se encuentran en el mercado y que este puede ser extrapolado a distintas regiones colocando los factores de cada lugar y haciendo los ajustes necesarios, cabe aclarar que esta herramienta es de soporte para a toma de decisiones pero entendemos que siempre es imprescindible la intervención humana para ver las posibilidades y que también quedan fuera de alcance distintos factores mencionados en el desarrollo del trabajo. Notamos que en la actualidad, en la Argentina, los buses eléctricos comprados no

tuvieron un análisis profundo de todas las opciones disponibles ni las distintas posibilidades por lo que creo que es una gran oportunidad para tomar este documento como puntapié para tener una visión más general y con un equipo de trabajo interdisciplinario abordar esta temática tan compleja y con gran cantidad de componentes.

Vemos que la herramienta aumenta la velocidad en la decisión, integra muchas problemáticas en la toma de decisión de la electrificación de una línea y, a su vez, analiza distintas variables en simultáneo siendo fundamental para darle soporte técnico a un tomador de decisiones.

Como próximos pasos considero que se deberá profundizar en el análisis efectuado aquí solicitando al Estado que cree una política pública acorde a la toma de datos y a la electrificación de las líneas para aumentar el impacto positivo ambiental.

3. Bibliografía y referencias

- Bloomberg New Energy Finance, “Electric buses in cities. Driving towards cleaner air and lower CO2”. Disponible en: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>.
- K. Bradsher, “China Vies to Be World’s Leader in Electric Cars”. Disponible en: <https://www.nytimes.com/2009/04/02/business/global/02electric.html>.
- L. X. a. W. Z. Lu Lu, “How Did Shenzhen, China Build World’s Largest Electric Bus Fleet?”. Disponible en: <https://wri-india.org/blog/how-did-shenzhen-china-build-world%E2%80%99s-largest-electric-bus-fleet>.
- J. Ma, “Session 1 | Special Presentation: ShenZhen Experience” Video de YouTube. Subido por California Air Resources Board. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=89L-PbCiU5k&t=168s>.
- ZeEUS, “ZeEUS eBus Report #2. An updated overview of electric buses in Europe”. Disponible en: <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf>.
- ASSURED, “Specification of grid constraints”. Disponible en: https://assured-project.eu/storage/files/assuredd-22-specification-of-grid-constraints-final_1.pdf.
- Alexander Dennis Ltd., “Successful introduction of Europe’s largest fleet of electric buses, Prawaas India International Bus & Car Travel Show”. Disponible en: <https://india.uitp.org/sites/default/files/documents/ADLLargest-BusFleetLodon.pdf>.
- M. Vanhoutte, “Introducing a fleet of zero emission buses”. Disponible en: <https://eu-smartcities.eu/clusters/11/documents>.

Schunk & Heliox, “Charging urban life”. Disponible en: <https://epri.azureedge.net/documents/busandtruck/20180612/4%20Bus%20and%20Truck%20Meeting%20-%20June%202018%20-%20Charging%20Urban%20Life.pdf>.

ABB, “Fleet of ABB bus chargers will power Hamburg’s drive into the e-mobility future”. Disponible en: Fleet of ABB bus chargers will power Hamburg’s drive into the e-mobility future.

EB Start, “Electric Bus Industry Continues to Make Strides in 2018”. Disponible en: <https://www.ebstart.co/press-release-1-31-2019>.

“Micros de Santiago: Buses eléctricos BYD K9 FE”. Disponible en: <http://administracionytransportes.cl/2019/04/01/buses-electricos-byd-k9-fe-santiago/>. Cavitas 2020.

VTT International Conference Electric Mobility and Public Transport 2017

EMBARQ Exhaust emissions of Transit buses

Charging Network Planning for Electric Bus Cities

Global EV Outlook 2019.

BID “La incorporación de los vehículos eléctricos en América Latina”.

C40 Cities Finance Facility (CFF) en colaboración con Grütter Consulting, “Análisis de buses eléctricos para el corredor cero emisiones Eje 8 Sur”, 2018.

CNRT.

Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires.

Programación Lineal y su Entorno Miranda 2da edición.

Métodos Cuantitativos para la Toma de Decisiones. Danel Serra de La Figuera.

Investigación de Operaciones novena edición. Hamdy A. Taha.

Anexos:

En el siguiente enlace se podrá ver todo el desarrollo de la investigación, el Modelo de Modelos con los datos recolectados hasta el momento mencionados en el trabajo y sus tablas correspondientes, el manual de usuario, entre otros: https://drive.google.com/drive/folders/10pNZRJJz7jkdU4N7pfdX7APbwqgC_BKy?usp=sharing

El modelo está en archivo Excel con el complemento OpenSolver para poder resolver la programación matemática lineal.

En el siguiente enlace se encuentra un instructivo de descarga: <https://opensolver.org/installing-opensolver/>

Aclaración: el manual de usuario se considera como ayuda para poder utilizar la herramienta, pero es imprescindible un entendimiento completo de esta, que se desarrolla en el trabajo. Esto se logra entendiendo en profundidad este documento e interactuando con el modelo en la práctica.

MICROMOVILIDAD



PLAN INTEGRAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALQUILER DE BICICLETAS COMPARTIDAS FLOTANTES

Marcos Lalanne y Fernando Paulucci

Resumen

El siguiente estudio se trata del análisis del sistema actual de bicicletas compartidas en la Ciudad de Buenos Aires para identificar oportunidades y generar una propuesta de valor que lo complemente, identificando zonas de alto potencial y comprendiendo la interacción de las distintas variables para alcanzar diferentes niveles de servicio que permitan maximizar la rentabilidad.

1. Introducción

Dados los cada vez más conocidos beneficios de la movilidad en bicicletas en grandes urbes, entender el estado en el que se encuentra el sistema de cada ciudad es importante a la hora de encontrar oportunidades.

La Ciudad de Buenos Aires ha evolucionado su sistema desde su creación en 2010 hasta el día de hoy, que ya cuenta con casi 400 estaciones y más de seis millones de viajes anualizados. Esta evolución va en línea con lo ocurrido en el mundo en ese mismo período. Sin embargo, surge la pregunta sobre si el sistema de Buenos Aires es el adecuado o si aún existe una oportunidad mayor.

Figura 1. Evolución de bicicletas compartidas en el mundo por año (miles)

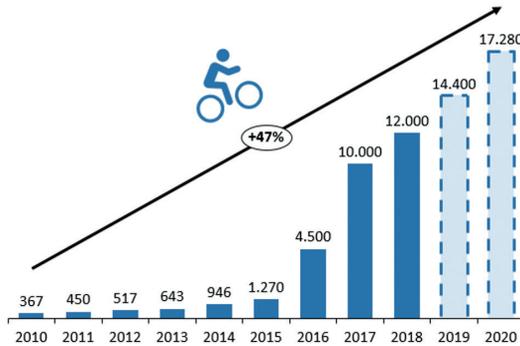
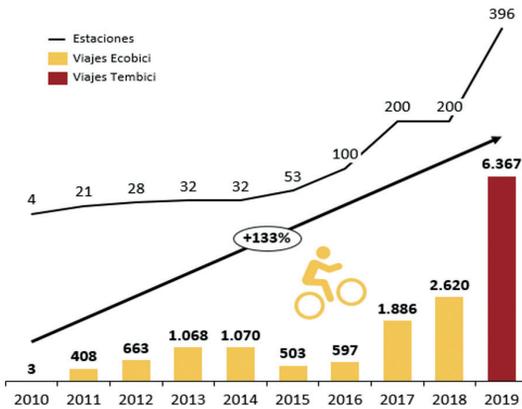


Figura 2. Evolución de viajes y cantidad de estaciones de Ecobici por año (miles)



Un indicador que otorga una primera mirada sobre un eventual potencial de negocio tiene que ver con su comparación con otras ciudades en el mundo. Lo que se observa es que, pese a su densidad de población, la Ciudad de Buenos Aires se encuentra en bajos niveles en dos indicadores utilizados para analizar la madurez de los sistemas compartidos: viajes cada 1000 habitantes y relación entre tamaño de flota y densidad poblacional (ver Figura 3).

Figura 3. Indicadores de sistemas compartidos de ciudades

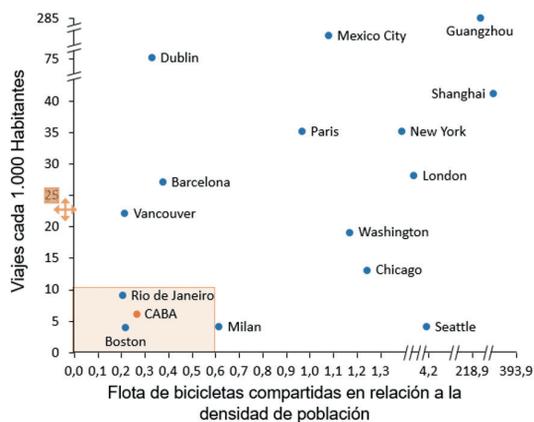
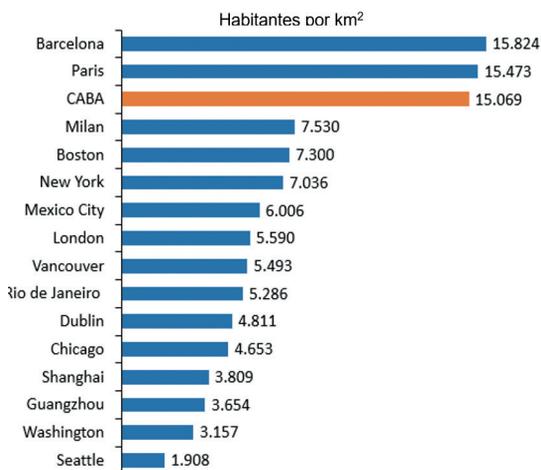


Figura 4. Densidad de población por ciudad



Las conclusiones impulsan a analizar la existencia de una demanda insatisfecha en la Ciudad de Buenos Aires y la posibilidad de poder satisfacerla mediante un sistema de bicicletas compartidas.

2. Metodología

La primera incógnita por resolver es la existencia de predisposición a pagar por viajes en bicicletas compartidas. Se realizó una encuesta que demostró que en Buenos Aires, a pesar de la existencia de un sistema gratuito, existe disposición para pagar por el servicio.

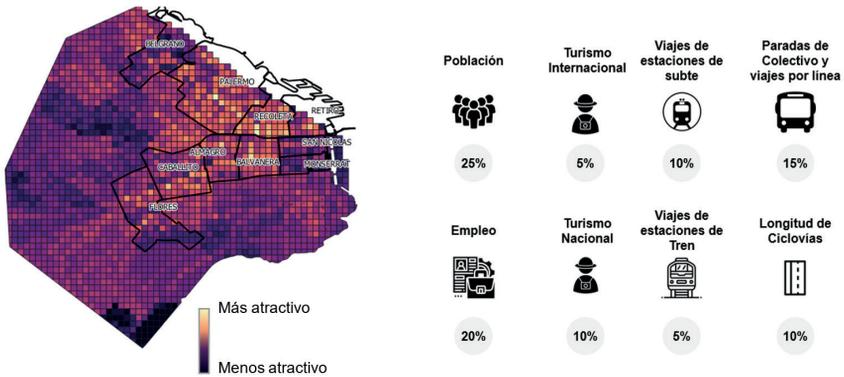
Para poder establecer el potencial de la Ciudad de Buenos Aires, medido como demanda insatisfecha, y poder generar un planeamiento de la demanda y definición preliminar del área de servicio, se abordó en cuatro pasos:



Lo primero fue realizar un mapa de calor geográfico para evaluar zonas de mayor atractividad para un sistema de bicicletas compartidas. Así, el primer paso consistió en dividir los barrios de CABA en cuadrantes de 300 metros de lado. Dicho número se extrajo como resultado de una encuesta realizada como parte del trabajo, en el que se estableció como una distancia que la gente estaría dispuesta a caminar.

Una vez segmentada la Ciudad, definimos ocho variables relevantes para definir de forma preliminar barrios de interés: población, cantidad de empleos, turismo nacional e internacional, cercanía a estaciones de subte, tren y paradas de colectivo considerando la distribución de viajes, y longitud de ciclovías. Para cada una de ellas, construimos un mapa de calor de los cuadrantes y luego, mediante el método de ponderación de factores, obtuvimos un mapa de calor ponderado final. De esta forma, seleccionamos los diez barrios de interés con mayor atractividad.

Figura 5. Mapa de calor ponderado final de cuadrantes de CABA – Diez Barrios de interés



Dentro de los barrios seleccionados, el segundo paso fue estimar la demanda insatisfecha actual de las estaciones de Ecobici. Registrando la disponibilidad de bicicletas para cada una de ellas en intervalos de un minuto durante semanas, obtuvimos el porcentaje de tiempo en que se encuentran vacías por hora del día. Al mismo tiempo, conociendo de información pública los viajes realizados por cada estación por hora, se calculó cuántos viajes se habrían hecho si siempre hubiera habido al menos una bicicleta disponible por estación. Combinando ambos *inputs*, se estimó la demanda para el tiempo vacío por estación y hora del día, lo cual resultó en la demanda insatisfecha de Ecobici por barrio.

El tercer paso consistió en estimar la demanda de los cuadrantes a partir de la demanda insatisfecha de Ecobici. Para un grupo de cuadrantes que contenía geográficamente estaciones de Ecobici fue fácil de realizar. Para el segundo grupo, que representaba un 70% del total de cuadrantes, fuimos conservadores y asumimos una demanda igual a la mínima del cuadrante del primer grupo coincidente en el barrio. De esta forma, el segundo grupo representó el 30% de demanda estimada.

Finalmente, en la última etapa analizamos la interacción de demanda que existe entre los barrios. Mediante información pública de Ecobici, conocíamos el origen y destino de cada viaje realizado en sus estaciones de bicicletas. Así, construimos una matriz orígenes destino con los barrios de interés, que contiene el porcentaje de demanda que comienza en un barrio y finaliza en ese o en otros. Distribuyendo la demanda insatisfecha obtenida en la etapa anterior, identificamos preliminarmente tentativos a Palermo, Recoleta, Belgrano, Balvanera, San Nicolás y Almagro.

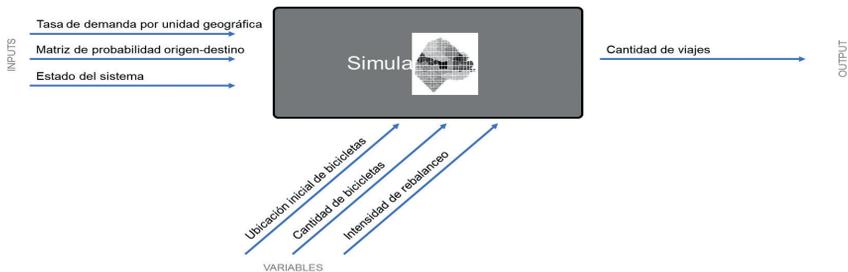
Figura 6. Matriz orígenes destino de viajes por Barrio

		Destino										
		Almagro	Balvanera	Belgrano	Caballito	Flores	Montserrat	Palermo	Recoleta	Retiro	San Nicolas	Grand Total
Origen	Almagro	29%	14%	1%	15%	3%	3%	18%	11%	1%	4%	100%
	Balvanera	13%	32%	1%	5%	2%	8%	10%	14%	3%	13%	100%
	Belgrano	1%	1%	64%	1%	0%	0%	26%	4%	1%	1%	100%
	Caballito	12%	5%	1%	55%	12%	2%	8%	3%	1%	2%	100%
	Flores	3%	2%	1%	21%	67%	1%	3%	1%	0%	1%	100%
	Montserrat	4%	12%	1%	3%	1%	29%	4%	7%	8%	32%	100%
	Palermo	6%	4%	10%	3%	1%	1%	56%	14%	2%	3%	100%
	Recoleta	6%	10%	3%	3%	1%	3%	26%	32%	8%	9%	100%
	Retiro	2%	6%	2%	1%	0%	8%	11%	20%	21%	29%	100%
	San Nicolas	3%	10%	1%	2%	1%	16%	6%	11%	13%	38%	100%
Grand Total	8%	9%	9%	10%	6%	6%	24%	13%	5%	11%	100%	

Obtenida la demanda insatisfecha por el sistema actual, y adicionando también a aquellos cuadrantes sobre los que Ecobici no cuenta con estaciones, se obtuvo la demanda total del sistema horaria por cuadrante. Mediante el análisis de las estaciones de Ecobici se generó una matriz origen-destino que establece la probabilidad de que un viaje que sale de un cuadrante vaya a cualquier otro cuadrante.

Una vez definida la demanda por cuadrante y su interrelación de viajes horario entre cuadrantes se llevó a cabo una simulación, de manera tal de poder cuantificar la mejora en nivel de servicio que genera cada variación en las variables del sistema, que son la cantidad de bicicletas, su ubicación inicial en el día, la intensidad del rebalanceo.

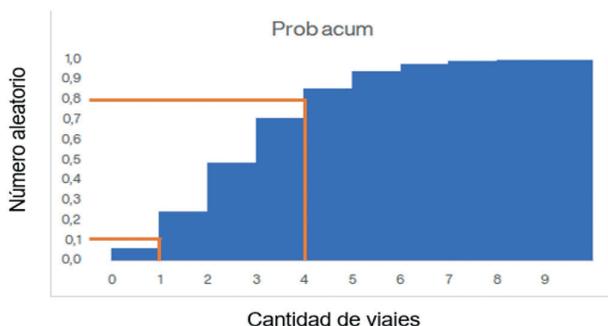
Figura 7



Para ello, con fundamento en dos bases de información, la matriz de origen-destino y la tasa horaria esperada de viajes por cuadrante, se generó una simulación, en la que cada hora simulada aportaba resultados mediante la utilización

de más de 200 números aleatorios, ya que la cantidad de viajes demandados por hora por cuadrante se daba representada por un proceso de Poisson.

Figura 8. Simulación de Montecarlo – Ejemplo para demanda de viajes



Para ver si ese viaje efectivamente se captura o no, se compara el stock de bicicletas al comienzo de ese horario, que era el resultado de los movimientos de la hora anterior, con la demanda. Si la demanda fuera mayor, sería el caso en el que se genera un quiebre de stock.

Respecto a las variables del sistema, el rebalanceo es un ejercicio común de los sistemas de bicicletas compartidas, que consiste en mejorar la distribución de la flota, trasladando bicicletas ociosas de ciertas áreas a otras donde existen viajes perdidos. De esta forma, se incrementan los viajes realizados y el nivel de servicio mejora, como también la calidad percibida por los clientes. Existen dos tipos de rebalanceo: estático y dinámico.

El primero debe su nombre a que se realiza mientras el sistema no está operando o el nivel de actividad es bajo, que ocurre típicamente en horario nocturno. Durante la noche, rebalanceadores en camioneta recorren la ciudad trasladando bicicletas entre cuadrantes, de manera que el día siguiente inicie con una ubicación óptima de flota. En la simulación, evaluamos diferentes formas de distribución para analizar el impacto en el nivel de servicio; estudiamos una distribución uniforme, en mitades, en cuartiles y proporcional a los viajes perdidos de los cuadrantes. Finalmente, comparativamente al caso de no hacer rebalanceo (dejar las bicicletas al principio del día en el lugar donde terminaron el día anterior), logramos realizar el 48% de los viajes que se perderían en caso de no hacer rebalanceo.

Por otra parte, el rebalanceo dinámico ocurre cuando el sistema está activo, típicamente durante el día. El funcionamiento es similar al estático, donde rebalanceadores en camioneta trasladan bicicletas ociosas a zonas de mayor

que incrementar el tamaño de la flota a una misma demanda reduce el uso de cada bicicleta, lo cual disminuirá la rentabilidad de cada una. La segunda conclusión es el incremento del nivel de servicio por practicar mayor rebalanceo dinámico, el cual lo medimos modificando la cantidad de camionetas. También se observa una ganancia marginal de viajes a medida que aumenta la intensidad de rebalanceo. La diferencia con el caso anterior es que en este el uso de cada bicicleta aumenta; la desventaja en rentabilidad se reflejará en el costo luego en el costo operativo de las camionetas.

Figura 10. Evolución del nivel de servicio en función de la cantidad de bicicletas

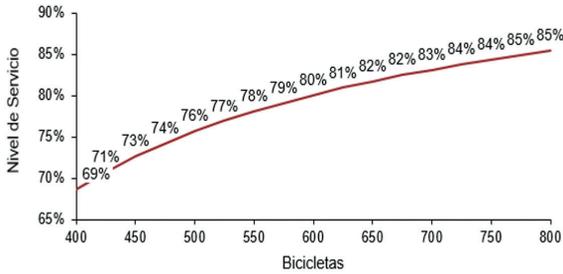
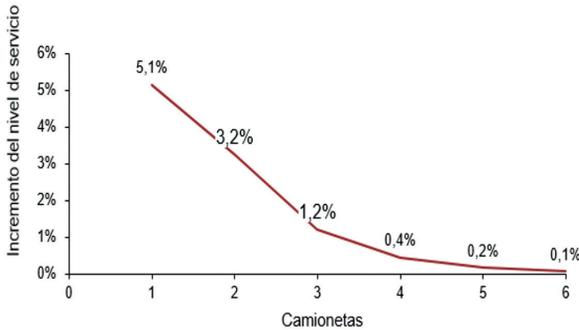


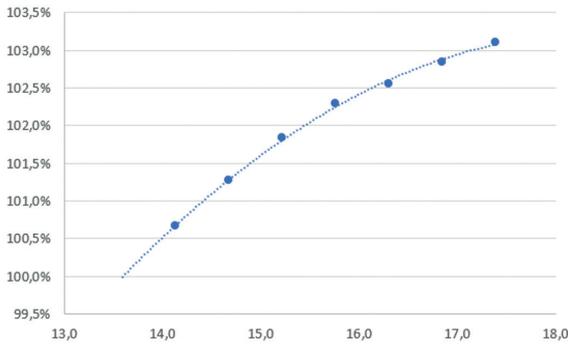
Figura 11. Incremento del nivel de servicio en función de la cantidad de camionetas de rebalanceo



Finalmente, se decidió profundizar el análisis modificando la demanda del sistema, y así extraer conclusiones sobre cómo varía el nivel de servicio en función de diferentes densidades de viajes. Conociendo su magnitud en Palermo y Recoleta (~13,6 viajes por cuadrante) y el valor de densidad de viajes máximo dado por todos los barrios de interés en un misma área de servicio (~17,4 viajes

por cuadrante), simulamos escenarios manteniendo la relación de flota de bicicletas y demanda. Así, identificamos que el nivel de servicio aumenta. Intuitivamente, se relaciona a que cuanto más densa sea la distribución de viajes, más probable es que los usuarios estén continuamente cerca de una bicicleta. Esta conclusión es alentadora para expandirse otros barrios, ya que no solo estamos agregando nuevos barrios sino que, por su comportamiento de red, estamos incorporando viajes entre los barrios que ya estaríamos ocupando y los nuevos.

Figura 12. Incremento relativo del nivel de servicio por mayor densidad de viajes respecto a Palermo y Recoleta a un ratio de bicicletas y demanda



4. Discusión y conclusiones

Finalizado el estudio de mercado y técnico, procedimos a responder los siguientes interrogantes:

1. Habiendo simulado para la demanda de Palermo y Recoleta, ¿cómo podemos estimar el nivel de servicio de forma escalable a otros cuadrantes y barrios?
2. Dada una demanda, ¿cuál es la alternativa óptima en tamaño de flota de bicicletas y cantidad de camionetas que maximizan los resultados brutos?
3. ¿Cómo definimos los escenarios finales de inversión entre todos los barrios de interés definidos?
4. ¿Qué formas de expandirse a otros cuadrantes y barrios y cómo impactan en el nivel de servicio prestado?

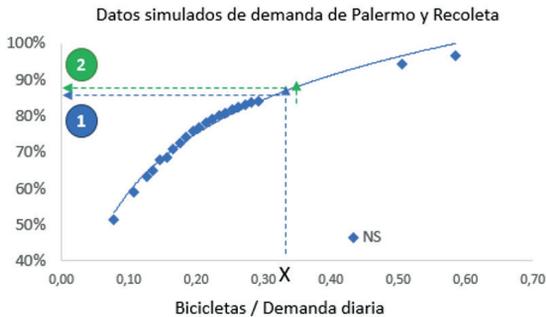
Abordamos estas preguntas en tres etapas:



Tomando como aprendizaje las simulaciones de Palermo y Recoleta, la primera etapa consistió en construir un modelo estimador del nivel de servicio en función de la demanda diaria, cantidad de bicicletas, camionetas y densidad de demanda por cuadrante.

En primer lugar, dada una demanda, estimamos el nivel de servicio sin rebalanceo dinámico como función de la relación de bicicletas y demanda y de la densidad de viajes por cuadrante que tienen Palermo y Recoleta (paso 1 en el gráfico). Luego, aplicamos un factor de corrección para ajustar a una densidad de viajes por cuadrante mayor, ya que partiendo de Palermo y Recoleta como área de servicio, la expansión a otros barrios aumenta la densidad de viajes; de esta forma, ajustamos el nivel de servicio contemplando ese factor, aunque su variación es baja (paso 2 en el gráfico).

Figura 13. Nivel de Servicio en función de la relación de Bicicletas y Demanda sin rebalanceo dinámico

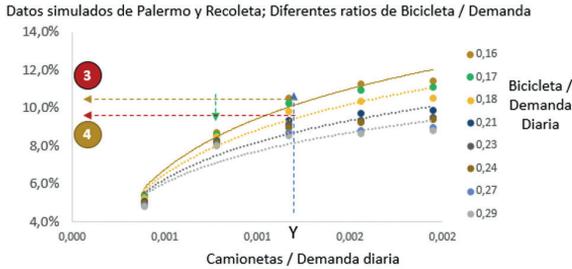


Luego, estimamos el incremento del nivel de servicio por practicar rebalanceo dinámico. El primer paso fue calcularlo como función de la relación de camionetas y demanda tomando como referencia una cantidad de bicicletas en el sistema (paso 3 del gráfico). Luego, aplicamos un ajuste corrigiendo la cantidad de bicicletas en relación con la demanda (paso 4 de la Figura 14).

La segunda etapa consistió en identificar la alternativa óptima de bicicletas y camionetas que maximiza la rentabilidad para cada escenario de demanda; estos escenarios se enmarcaban en una cota inferior por Palermo y Recoleta, con una demanda de 2.600 viajes por día, y en una cota superior incluyendo a Belgrano, Balvanera, San Nicolás y Almagro, con 6.400 viajes por día.

La alternativa óptima fue calculada contemplando resultados brutos anuales: ingresos por viajes y costos, que incluyen los costos de bicicletas y componentes (incluyendo

Figura 14. Incremento del Nivel de Servicio en función de la relación de Camionetas y Demanda



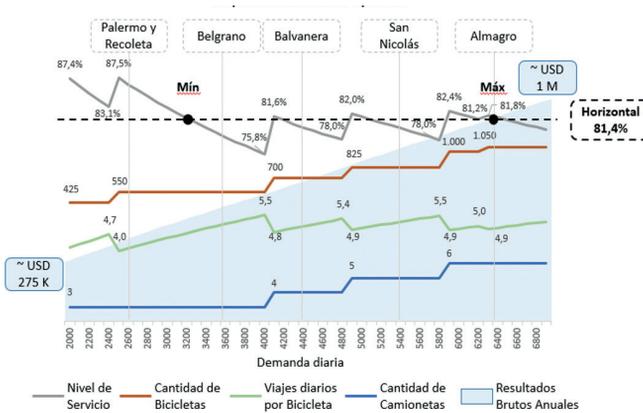
importación), sueldos de mecánicos y rebalanceadores, costos de alquiler de camionetas, combustible y canon de servicio normativo.

Se construyó un mapa de alternativas óptimas para visualizar cómo evolucionan los resultados brutos, el nivel de servicio, la flota de bicicletas, cantidad de camionetas y el uso diario por bicicleta a medida que el área de servicio se expande de Palermo y Recoleta al resto de los barrios de interés.

La primera conclusión a la vista es que siempre conviene expandirse, ya que los resultados brutos incrementan continuamente. En segundo lugar, se observó que la expansión se puede efectuar de tres maneras:

1. Sin incrementar la flota de bicicletas y cantidad de camionetas de rebalanceo: el uso diario de la flota incrementa, pero el nivel de servicio se reduce notoriamente y también lo haría la calidad percibida por los usuarios.
2. Incrementando únicamente la flota de bicicletas: el nivel de servicio aumenta notoriamente y cae el uso diario de la flota.
3. Incrementando la flota de bicicletas y cantidad de camionetas de rebalanceo: el nivel de servicio aumenta notoriamente, pero el uso diario por bicicleta se reduce de la misma forma.

Figura 15. Mapa de alternativas óptimas



En síntesis, en el desarrollo del estudio de mercado, se validó la existencia de una demanda potencial insatisfecha en la Ciudad de Buenos Aires. A su vez, se corroboró la predisposición a pagar por el servicio flotante, evidenciada por la encuesta.

Mediante la simulación se analizó cómo se comporta un sistema de bicicletas compartidas en relación con las variables que lo mueven: rebalanceo estático y dinámico y cantidad de bicicletas. De esta manera, se construyó un modelo capaz de estimar el nivel de servicio en función de cualquier superficie, tamaño de flota de bicicletas y cantidad de camionetas de rebalanceo. Por último, se identificaron las formas de expansión geográfica con sus ventajas y desventajas, de manera tal que su decisión y forma deba ser parte una decisión estratégica de negocio a largo plazo.

5. Bibliografía

<https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/argentina>
<https://economipedia.com/definiciones/simulacion-de-montecarlo.html>
<https://economipedia.com/definiciones/teorema-central-del-limite.html>
<https://www.expoknews.com/dia-mundial-de-la-bicicleta-conoce-la-historia-de-los-sistemas-de-bicis-compartidas/>
<https://datosmacro.expansion.com/bono/usa>
<http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/>
https://www.ourstreetsmpls.org/does_bike_commuting_affect_your_carbon_footprint_and_how_much#:~:text=The%20European%20Cyclists%20Federation%20has,of%20CO2%20per%20km%20ridden.

<https://www.ecobici.cdmx.gob.mx/>

[https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Guia-para-la-es-
tructuracion-de-sistemas-de-bicicletas-compartidas.pdf](https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Guia-para-la-es-
tructuracion-de-sistemas-de-bicicletas-compartidas.pdf)

<https://data.buenosaires.gob.ar/dataset/bicicletas-publicas>

<https://mobike.com/global/>

[https://www.infobae.com/america/mexico/2019/08/01/monopatines-robados-a-
grin-se-venden-en-redes-sociales-mientras-la-empresa-suspendio-activida-
des-por-la-perdida-de-unidades/](https://www.infobae.com/america/mexico/2019/08/01/monopatines-robados-a-
grin-se-venden-en-redes-sociales-mientras-la-empresa-suspendio-activida-
des-por-la-perdida-de-unidades/)

